

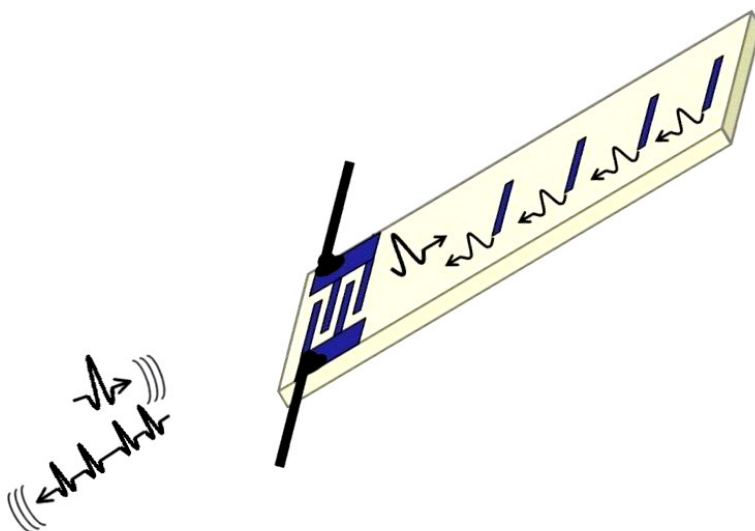
**David Paulo
Torres Macário**

**Utilização de Dispositivos de
Onda Superficial Como
Sensores e Identificadores**

**David Paulo
Torres Macário**

Utilização de Dispositivos de Onda Superficial Como Sensores e Identificadores

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Dinis Gomes de Magalhães dos Santos, Professor catedrático do Departamento de Electrónica Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho à minha família...

O júri:

José Fernando da Rocha Pereira (Presidente)

Professor associado do Departamento de Electrónica e
Telecomunicações da Universidade de Aveiro

Dinis Gomes de Magalhães dos Santos

Professor catedrático do Departamento de Electrónica e
Telecomunicações da Universidade de Aveiro

Carlos Alberto Caridade Monteiro e Couto

Professor catedrático do Departamento de Electrónica Industrial da
Universidade do Minho

Agradecimentos:

Agradeço em primeiro lugar a todos os meus amigos que de uma ou outra forma me apoiaram na elaboração deste trabalho.

Ao professor Dinis Santos, pelas ideias, dedicação e empenho na condução do meu trabalho.

E ao departamento de Electrónica Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro pelas condições e ambiente de trabalho.

Palavras-chave

SAW, filtro, sensor, ondas de superfície, transdutor interdigital, reflector, efeito piezoelétrico, modelo de campo cruzado e linha de atraso.

Resumo

Este trabalho consiste no estudo e aplicação de dispositivos de onda superficial como sensores e identificadores remotos passivos. Actualmente existe grande interesse em novas e emergentes aplicações dos dispositivos de onda superficial como sensores passivos. Neste texto, começa-se por fazer um resumo histórico, sendo em seguida abordados os principais conceitos, métodos de cálculo e de desenho dos dispositivos SAW (*Surface Acoustic Wave*). No fim os conhecimentos são aplicados ao desenho de um sensor SAW experimental, com capacidade de identificação e medida de grandezas físicas.

Keywords

SAW-*Surface Acoustic Wave Devices*, filter, sensor, surface waves, interdigital transducer, piezoelectric effect, reflector, cross-field model, delay line.

Abstract

This work consists of the study and application of Surface Acoustic Wave devices as passive sensors and identification tags. Currently there is a growing interest in new and emergent applications of surface acoustic wave devices as passive sensors. This text starts by making a historical summary, and then moves on to the main concepts, methods of calculation and drawing of SAW (*Surface Acoustic Wave*) devices. It concludes by applying this knowledge to the drawing of an experimental SAW sensor, with capacity of identification and measurement of physical quantities.

Abreviaturas e símbolos:

SAW – *Surface Acoustic Wave*

ST – *Stable Temperature*

KHz – Kiloherzt

MHz – Megahertz

GHz – Gigahertz

RF – Rádio Frequência

°C – Grau Centígrado

ppm – partes por milhão

dB – decibel

μs – microssegundo

ms – milissegundo

μm – micro-metro

mm – milímetro

m – metro

kg – quilograma

m³ - metro cúbico

λ – Comprimento de onda

Ω – Ohm

Lista de figuras:

Figura 1 – Radar de compressão de impulso, **9**

Figura 2 – Resposta de um filtro combinado, **9**

Figura 3 – Descrição do transdutor interdigital, retirado do artigo publicado em 1965 por White e Voltmer, [13], **10**

Figura 4 – Linha de atraso simples, utilizando dois transdutores interdigitais, **10**

Figura 5 – Funcionamento dos SAW, como sensores passivos, **13**

Figura 6 – Os vários tipos de ondas elásticas que se podem propagar nos sólidos, em (a) propagação longitudinal, (b) propagação transversal e em (c) onda superficial ou de Rayleigh, **15**

Figura 7 – Propagação de uma onda de superfície num material piezoelétrico, **17**

Figura 8 – Ilustração da propagação de uma onda de superfície e movimento das partículas num sólido, **18**

Figura 9 – Efeito piezoelétrico (a) directo, (b) indirecto: (i) contracção, (ii) expansão, **21**

Figura 10 – Comportamento piezoelétrico do quartzo (SiO_2), três moléculas ligadas em estrutura não centro-simétrica, (a) cristal em repouso sem polarização, (b) compressão do cristal, (c) expansão do cristal, **22**

Figura 11 – Cristal de quartzo na sua forma natural. Este mineral abundante na natureza foi explorado em vários pontos do país, por exemplo em Penalva do Castelo, **25**

Figura 12 – Estrutura hexagonal de um cristal de niobato de lítio LiNbO_3 , **26**

Figura 13 – Cristal de tantalato de lítio obtido artificialmente, **26**

Figura 14 – Exemplos de duas formas de gerar ondas de superfície, (a) mecanicamente e em (b) utilizando um material piezoelétrico e um transdutor interdigital, **28**

Figura 15 – Vista ao microscópio de duas frentes de onda geradas por um transdutor interdigital num substrato piezoelétrico, **28**

Figura 16 – Estrutura do transdutor interdigital uniforme em (a) retirada de [13], (b) representação da dualidade do transdutor interdigital, **29**

Figura 17 – Pormenor do *layout* das franjas metálicas de um transdutor interdigital, **29**

Figura 18 – Funcionamento do transdutor interdigital uniforme, **30**

Figura 19 – Transdutores interdigitais, (a) uniforme, (b) unidireccional e (c) de franja aberta “Split Finger”, **32**

Figura 20 – Geometria típica de um filtro com um transdutor interdigital de franja aberta à esquerda e um transdutor com comprimento de franja variável à direita., **32**

Figura 21 – Função de transferência e amplitude de onda a frequência normalizada, para um transdutor interdigital não uniforme, **33**

Figura 22 – Aplicação de transdutores interdigitais modificados na compressão ou expansão de impulsos, **33**

Figura 23 – Funcionamento de um sensor baseado em SAW, **34**

Figura 24 – Reflectores, estruturas típicas utilizadas em SAW, (a) uniforme aberto, (b) uniforme em curto circuito, (c) eléctrodos ligados em par e (d) tipo *Chevron*, **35**

Figura 25 – Dispositivo SAW visto como uma linha de transmissão, que poderá estar adaptada ou desadaptada alterando-se desse modo a reflectividade. Em (b) ilustração da situação em que o último reflector se encontra em curto-circuito, **35**

Figura 26 – Exemplo de um filtro passa banda comercial fabricado pela Murata, para andares de frequência intermédia em televisores, baseado na tecnologia dos SAW, **37**

Figura 27 – Funcionamento de um *duplexer*, **37**

Figura 28 – Curva de resposta de um *duplexer* fabricado pela Fugitso para a banda dos 824MHz a 894MHz, **38**

Figura 29 – Desenhos típicos para osciladores SAW, (a) oscilador de um porto e (b) oscilador de dois portos, **38**

Figura 30 – Função de transferência de um oscilador compacto para 432,92MHz baseado em SAW fabricado pela EPCOS, o substrato utilizado é o quartzo e a tolerância são 50kHz, retirado de [24], **39**

Figura 31 – Circuito eléctrico para um oscilador utilizando um dispositivo SAW de um porto, com saída adaptada, **39**

Figura 32 – Montagem e funcionamento de um sensor de binário produzido pela Honeywell [21], **40**

Figura 33 – Sensor de binário baseado em SAW [21], em (a) desenho do dispositivo, (b) funcionamento e (c) captura de uma resposta em osciloscópio, **41**

Figura 34 – Estruturas utilizadas nas etiquetas de identificação baseadas em SAW, em (a) reflectores separados e em (b) vários transdutores ligados na mesma linha, **42**

Figura 35 – Foto ampliada de uma etiqueta de identificação, notar as ligações do transdutor principal ao mundo exterior e a zona de codificação constituída por reflectores separados, construída num substrato de LiNbO_3 , **42**

Figura 36 – Sistema SOFIS [25], *Surface Acoustic Wave Identification System*, aplicado na identificação de carruagens nos comboios sub urbanos de Munique, Alemanha, **43**

Figura 37 – Funcionamento de um ecrã sensível ao toque, baseado na tecnologia dos SAW, **44**

Figura 38 – Estrutura de um sensor SAW no qual a medição de uma grandeza física é feita variando a impedância de carga de um dos portos, **49**

Figura 39 – Sistema de medição da pressão em pneus de automóveis, baseado em SAW, **50**

Figura 40 – Princípio de funcionamento dos actuadores baseados em SAW, **53**

Figura 41 – Pormenor da alimentação e transdutores interdigitais de um actuador experimental baseado em SAW, **53**

Figura 42 – Etiqueta de identificação baseada em SAW, com antena incluída, para a banda ISM de 2,44GHz. São evidentes as reduzidas dimensões do dispositivo, **54**

Figura 43 – Identificação de cento e quatro caixas de champô, utilizando etiquetas de identificação SAW apresentadas em [16], **55**

Figura 44 – Identificação de vários produtos empilhados utilizando etiquetas SAW, **55**

Figura 45 – Representação do circuito equivalente de um filtro transversal, **61**

Figura 46 – (a) Transdutor interdigital visto como um sistema de três portos, representação dos portos no modelo de campo cruzado, **61**

Figura 47 – Modelo de campo cruzado, aproximação do campo eléctrico gerado pelas franjas ao campo existente entre as placas de um condensador, **62**

Figura 38 – Representação de um transdutor interdigital como um sistema de três portos aos quais são associadas admitâncias, utilizando o modelo de campo cruzado. G_0 é a condutância característica equivalente de uma linha de transmissão SAW, **63**

Figura 49 – Admitância de entrada de um transdutor interdigital (porto eléctrico três), segundo o modelo de campo cruzado. C_t é o valor da capacidade total do transdutor interdigital, **64**

Figura 50 – Estrutura de um dipolo de meia onda [37], [39], **71**

Figura 51 – Dimensões e espaçamento entre franjas num transdutor interdigital uniforme, **73**

Figura 52 – Estruturas possíveis para o dispositivo SAW experimental, em (a) um transdutor interdigital IDT1 ligado a uma antena, com oito reflectores para identificação e um reflector final de um dos lados. Em (b) os reflectores estão dispostos de forma alternada, para aproveitar as duas frentes de onda geradas pelo transdutor interdigital de excitação, **74**

Figura 53 – Alteração ao dispositivo apresentado na figura 52 (a), **75**

Figura 54 – Alteração à estrutura do dispositivo apresentado na figura anterior, **76**

Figura 55 – Resultados obtidos por simulação utilizando o modelo de campo cruzado, para a impedância do transdutor interdigital em função do comprimento das franjas, utilizando 250 de pares de franjas (valor preestabelecido), **80**

Figura 56 – Pormenor do gráfico anterior, **81**

Figura 57 – Resultados obtidos por simulação utilizando o modelo de campo cruzado, para a impedância de um transdutor interdigital em função do número de pares de franjas, **81**

Figura 58 – Pormenor do gráfico anterior, **82**

Figura 59 – Variação da impedância de um transdutor interdigital com 300 pares de franjas de comprimento 200λ em função do raio de metalização, **83**

Figura 60 – Estrutura detalhada do transdutor interdigital uniforme de excitação, **84**

Figura 61 – Estrutura do dispositivo SAW experimental, **85**

Figura 62 – Processo anterior ilustrado no domínio do tempo em (a) e no domínio da frequência em (b), **86**

Figura 63 – Utilização do dispositivo SAW experimental, com medição de grandeza física utilizando carga variável, **87**

Figura 64 – Duas estruturas para o dispositivo SAW experimental, em (a) utilizam-se oito reflectores para gerar o código de identificação, espaçados entre si $700\mu\text{m}$. Em (b) são usados apenas quatro reflectores espaçados entre si $1400\mu\text{m}$, **88**

Figura 65 – Ilustração do fenómeno de difracção de uma frente de onda superficial, **92**

Figura 66 – Pormenor do *layout* de um reflector, **95**

Figura 67 – Estrutura de uma unidade de leitura baseada, baseada em amostragem no domínio do tempo, **100**

Figura 68 – Estrutura de uma unidade de leitura baseada, baseada em amostragem no domínio da frequência, **102**

Figura 69 – Circuito do bloco de rádio frequência do transmissor para 433,92MHz, **103**

Figura 70 – Simulação do funcionamento do circuito do transmissor para 433,92MHz, neste caso está-se a simular a geração de impulsos de rádio frequência com 25ns de duração e 100ns de intervalo entre impulsos, **104**

Figura 71 – Circuito do bloco de controlo do transmissor, baseado em micro controlador, **104**

Figura 72 – Montagem em circuito impresso do transmissor para 433,92MHz, (a) frentes, (b) verso e (c) aspecto final do dispositivo com a antena montada, **105**

Conteúdo:



Capítulo 1 – Introdução, 1

1.1 Introdução, 3



Capítulo 2 – Generalidades sobre dispositivos de onda superficial, 5

2.1 História dos dispositivos de onda superficial, 7

2.1.1 Introdução, 7

2.1.2 Breve História dos SAW, 8

2.2 Ondas de superfície, descrição e propagação, 14

2.2.1 Introdução, 14

2.2.2 Tipos de ondas elásticas em sólidos, 15

2.2.3 Ondas de superfície em materiais piezoelétricos, 18

2.3 Efeito piezoelétrico e materiais utilizados como substrato nos SAW, 20

2.3.1 Introdução, 20

2.3.2 Efeito piezoelétrico, 21

2.4 Materiais piezoelétricos e materiais utilizados como substrato em dispositivos de onda superficial, 25

2.5 Geração de ondas de superfície, transdutores interdigitais e reflectores, 27

2.5.1 Geração de ondas de superfície, 27

2.5.2 Transdutores interdigitais, 28

2.5.3 Desenvolvimentos nos transdutores interdigitais, 31

2.5.4 Reflectores, 34

2.6 Aplicações práticas dos SAW, 36

2.6.1 Introdução, 36

2.6.2 Processamento de sinal e rádio frequência, 36

2.6.3 Identificadores e sensores remotos passivos, 39



Capítulo 3 – Estado da arte, 45

3.1 Introdução, 47

3.2 Aplicações emergentes dos SAW, 48

3.2.1 Utilização de SAW's como sensores, 48

3.2.2 Utilização de SAW's como actuadores, 53

3.2.3 Utilização de SAW's como etiquetas (RFID's), 54



Capítulo 4 – Representações e modelos matemáticos dos transdutores interdigitais, 57

4.1 Introdução, 59

4.2 Modelo função delta, 60

4.3 Modelo de campo cruzado, 61

4.4 Resposta impulsional, 65



Capítulo 5 – Projecto de um dispositivo SAW experimental com capacidade para identificação e medida, 67

5.1 Introdução, 69

5.2 Especificações iniciais, 70

5.2.1 Frequência central de funcionamento e largura de banda, 70

5.2.2 Capacidade do código de identificação, 71

5.3 Selecção do substrato, 71

5.3.1 Largura e separação entre franjas dos transdutores interdigitais e reflectores, 73

5.4 Esboços de estruturas capazes de implementar os requisitos para o dispositivo SAW experimental, 74

5.5 Modelação e simulação dos parâmetros do transdutor interdigital uniforme de excitação, 77

5.5.1 Modelação de transdutor interdigital uniforme, utilizando o modelo de campo cruzado, 78

5.5.2 Simulação em computador, 79

5.6 Estrutura final do transdutor interdigital uniforme de excitação e reflectores, 83

5.6.1 Estrutura dos reflectores, 85

5.7 Estrutura final do dispositivo SAW experimental, 88

5.7.1 Fenómenos de difracção e região de Fresnel, 90

5.7.2 Largura de banda do dispositivo SAW experimental, 93

5.8 Pormenores de implantação física (*layout*) dos dispositivos, 94



Capítulo 6 – Ensaaios laboratoriais e electrónica de suporte, 97

6.1 Introdução, 99

6.2 Unidade de leitura, 99

6.2.1 Amostragem no domínio do tempo, 100

6.2.2 Amostragem no domínio da frequência, 101

6.3 Transmissor para 433,92MHz, com duração de impulso ajustável, 102



Capítulo 7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros, 107

7.1 Conclusões, 109

7.2 Desenvolvimentos futuros, 110

Anexos, 111

Tabela I, 113

Tabela II, 115

Tabela III, 117

Referências e bibliografia, 119

1

Introdução



Capítulo dedicado à introdução da temática e motivação do trabalho descrito neste texto.

1.1 Introdução

Nos dias de hoje existe um leque variadíssimo de aplicações relacionadas com a automação e monitorização de processos, onde é necessário utilizar sensores capazes de medir várias grandezas físicas tais como pressão, temperatura, binário, aceleração, humidade ou funcionar como etiquetas que permitam a identificação de objectos. As aplicações onde são utilizados os sensores vão desde a domótica, monitorização e controlo de processos industriais, medicina, indústria automóvel, electrónica, engenharia, ciência e segurança. Nas últimas décadas com a evolução dos conceitos de manutenção curativa e paliativa para o conceito manutenção preventiva, torna-se necessária uma rede de sensores que permitam a aquisição de informação sobre o estado de funcionamento das partes vitais de uma máquina, com vista à detecção de falhas ou ajuste do ponto de funcionamento.

Obviamente, para satisfazer necessidades de medição de grandezas físicas, existem disponíveis no mercado diversos tipos de sensores discretos, ou então soluções completas, os chamados sistemas de aquisição, que englobam sensores, aquisição de sinal e sua apresentação ou registo da informação, também conhecidos por sistemas de telemetria.

Porém, em muitas aplicações uma ligação por fio entre os sensores e os sistemas de aquisição é inviável. Nestes casos torna-se necessário utilizar sensores capazes de comunicar por radiofrequência com uma unidade de aquisição central, o que à partida apresenta vários inconvenientes e problemas relacionados com a alimentação e manutenção periódica dos sensores ou etiquetas de identificação, principalmente se estes tiverem localizados em lugares perigosos ou de difícil acesso. Por exemplo numa câmara onde exista um qualquer processo isolado, radiação, químicos, altas temperaturas ou ainda em estruturas variadas de edifícios, pontes, etc. Nestes casos, estão a emergir soluções baseadas na utilização de dispositivos de onda superficial (*SAW-Surface Acoustic Wave Devices*) [1], interrogados via rádio utilizando técnicas de radar. Estes dispositivos apresentam-se como uma alternativa de peso e oferecem novas e excitantes alternativas para a medição remota de grandezas físicas.

Comparados com os dispositivos de telemetria clássicos, os SAW tem como principais vantagens a possibilidade de poderem ser interrogados remotamente sem fios, a alguns metros, não necessitarem de manutenção e sobretudo não requererem qualquer

tipo de alimentação eléctrica. Uma vez que estes dispositivos respondem, reenviando uma fracção da energia com que foram irradiados, modulada segundo a variação do parâmetro a físico a medir.

Os dispositivos SAW podem ser vantajosamente aplicados em peças em movimento, ambientes perigosos, tóxicos, altamente radioactivos ou zonas contaminadas, onde o uso de sensores convencionais é impossível, dispendioso ou perigoso.

2

Generalidades sobre dispositivos de onda superficial



Neste capítulo o leitor será enquadrado com a origem e desenvolvimento da tecnologia dos SAW. São expostos conceitos gerais sobre ondas de superfície, sua geração e propagação, piezoelectricidade, transdutores interdigitais e alguns exemplos de aplicações de sucesso dos dispositivos SAW em electrónica, processamento de sinal e como sensores passivos de várias grandezas.

2.1 - História dos dispositivos de onda superficial

2.1.1 Introdução:

Os dispositivos de onda superficial são utilizados na electrónica há já muitos anos. Inicialmente foram utilizados em osciladores de quartzo obtendo-se factores de qualidade, Q , bastante elevados como consequência das baixas perdas acústicas. Foram também empregues na construção de linhas de atraso, permitindo o processamento de sinais analógicos de forma versátil e económica, explorando as baixas velocidades acústicas que caracterizam estes dispositivos, permitindo um grande atraso (milissegundos), num espaço pequeno.

Em 1965 foram introduzidos os primeiros dispositivos de onda superficial permitindo aos sistemas electrónicos, durante o trajecto de propagação de um sinal, gerar, receber ou modificar os sinais. Estes dispositivos foram inicialmente desenvolvidos essencialmente para resolução de problemas relacionados com o aperfeiçoamento dos sistemas de radar. Nos trinta anos subsequentes, houve uma explosão no desenvolvimento e aplicação deste tipo de dispositivos, entre 1970 e 1985 o esforço de investigação nesta área centrou-se no estudo da propagação das ondas de superfície e em materiais a utilizar como substrato. A partir daí o aumento das exigências e número de aplicações, obrigou a um refinamento dos modelos matemáticos e métodos de projecto. Actualmente, as aplicações destes dispositivos, variam desde os filtros de compressão de impulsos utilizados nos sistemas de radar (primeira aplicação destes dispositivos), sistemas de telecomunicações, até produtos para o consumidor final como TV, Rádio, Telemóveis [2]. Recentemente têm sido aplicados com sucesso, como sensores de várias grandezas físicas [1] ou dispositivos de identificação passivos [5] e na indústria aeroespacial [3].

2.1.2 Breve História dos SAW

A demonstração da existência das ondas de superfície, foi feita por Lord Rayleigh (na foto ao lado), no seu artigo de 1885 intitulado *‘On waves propagating along the plane surface of an elastic solid’*. A partir daí as ondas de superfície passaram a ser chamadas com alguma frequência, ondas de Rayleigh.



Na altura Rayleigh estava interessado no estudo dos registos sísmicos observados após um abalo de terra. Demonstrou que a existência de uma componente atrasada em relação aos sinais previstos devido às ondas longitudinais e transversais predominantes, poderia ser explicado pela existência de uma onda superficial mais lenta.

Posteriormente, foram publicados por outros investigadores geofísicos, vários trabalhos relacionados com as ondas de superfície, sempre virados para o estudo de fenómenos sismológicos e de aplicação deste tipo de ondas, por exemplo na detecção de falhas e fissuras em placas ou superfícies. Para isso eram utilizados transdutores primitivos constituídos essencialmente, por um bloco de material piezoelétrico montado entre dois eléctrodos, aos quais era aplicado um impulso eléctrico.

O interesse no estudo e aplicação das ondas de superfície na electrónica e instrumentação é recente, comparativamente ao atrás descrito, tendo surgido originalmente devido às exigências no desenvolvimento dos sistemas de radar. Estes sistemas foram estreados, e largamente utilizados, na II Guerra Mundial, permanecendo secretos todos os estudos durante a mesma. Após a guerra, o estudo sobre a compressão de impulsos foi revelado num artigo muito conhecido de Klauder e sua equipa, intitulado *‘The theory and design of chirp radars’*. Neste trabalho, foi demonstrado que a eficácia de um sistema de radar pode ser aumentada se forem transmitidos impulsos com maior duração, de potência constante, nos quais a frequência varie ao longo do tempo, preferencialmente com largura de banda constante. No receptor existiria um filtro combinado, responsável por otimizar a relação sinal-ruído. Basicamente, terá de existir uma linha de atraso, com um atraso diferente para as várias frequências, permitindo que todas cheguem ao mesmo

tempo à saída. A técnica era fácil de compreender na teoria, porém de difícil implementação prática.

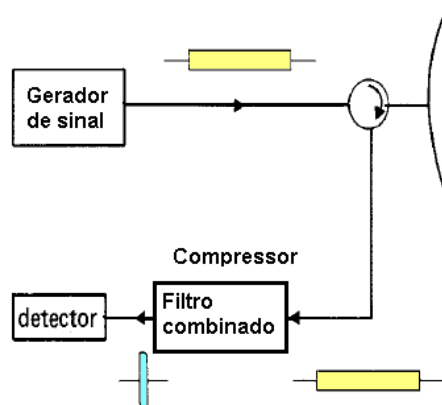


Figura 1 – Radar de compressão de impulso.

Na altura eram utilizados impulsos com duração de cerca de 10ms, o que, utilizando os métodos convencionais na época, baseados em linhas de transmissão e circuitos L-C, tornaria os filtros volumosos e de difícil execução prática. Nestas condições era natural que as ondas acústicas, com velocidades de propagação cerca de 10^5 vezes menores, que as das ondas electromagnéticas fossem tidas em conta como solução para a realização de filtros combinados mais compactos e fiáveis.

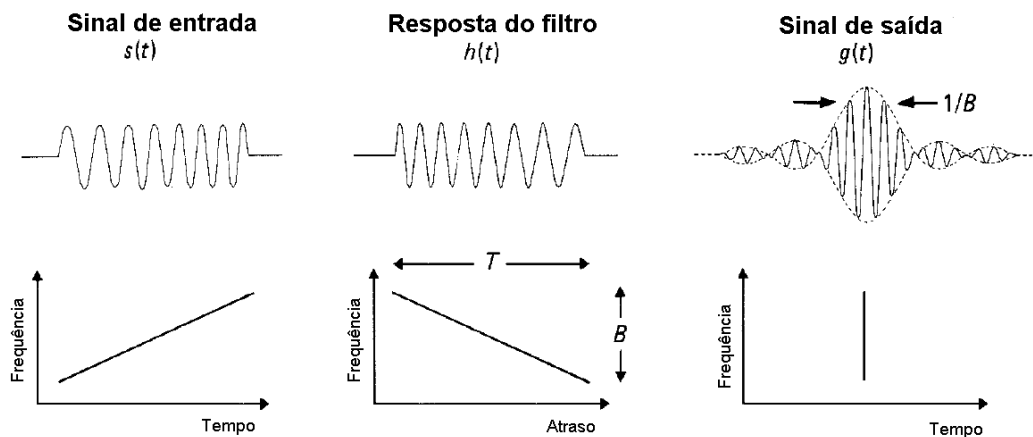


Figura 2 – Resposta de um filtro combinado.

No entanto, a criação de linhas de atraso eficientes utilizando ondas de superfície não foi imediata, tendo exigido bastante trabalho de pesquisa e frustrações a vários grupos de investigação. A primeira realização experimental de tais ideias surgiu em 1965, no artigo de White e Voltmer, '*Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves*', no qual foi apresentado o transdutor interdigital (IDT- Interdigital Transducer) com franjas de comprimento constante, capaz de gerar e receber ondas de superfície numa placa de

quartzo (SiO_2). Este transdutor consiste essencialmente num conjunto de franjas metálicas, intercaladas estrategicamente e ligadas alternadamente a duas linhas condutoras de alimentação e ligação a mundo exterior. O transdutor interdigital será tratado com maior detalhe mais adiante.

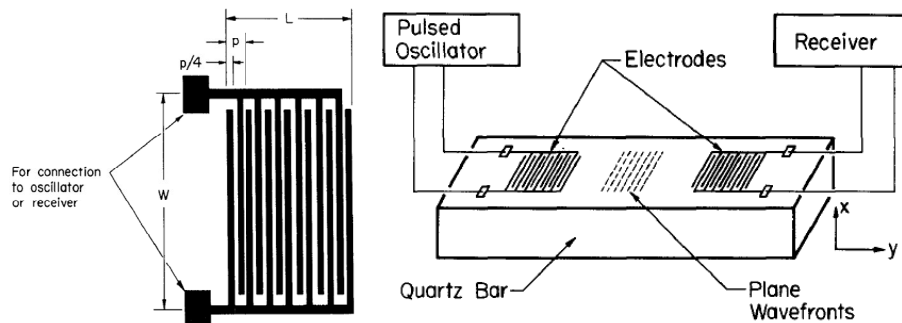


Figura 3 – Descrição do transdutor interdigital, retirado do artigo publicado em 1965 por White e Voltmer, [13].

Pouco tempo depois, em 1969 o grupo de Tancrell publicou um artigo intitulado, *'Dispersive delay lines using ultrasonic surface waves'*, no qual foi apresentada a primeira linha de atraso fiável utilizando transdutores interdigitais. Esta linha de atraso para 60MHz, com largura de banda de 20MHz e um atraso de 1 milissegundo, foi construída sobre um substrato de niobato de lítio (LiNbO_3).

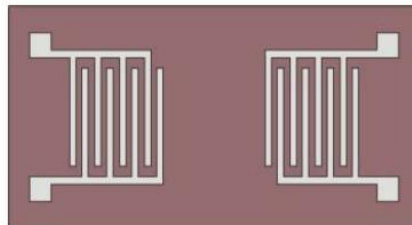


Figura 4 – Linha de atraso simples, utilizando dois transdutores interdigitais.

Estes desenvolvimentos deram origem aos dispositivos de onda superficial modernos, mais conhecidos por SAW (Surface Acoustic Wave Devices). Os transdutores interdigitais, facilmente fabricados utilizando o processo de litografia, substituíram os transdutores primitivos inicialmente utilizados no estudo de fissuras em materiais. Outro factor crucial foi a disponibilidade na altura de materiais piezoeléctricos, previamente estudados para aplicações na acústica, como o quartzo e o niobato de lítio. Nestes materiais o campo eléctrico e a deformação mecânica dos materiais estão relacionados, o que permite a sua utilização quer no processo de transdução quer como meio de propagação das ondas de superfície.

O transdutor interdigital foi então reconhecido como um componente eficaz e os dispositivos de onda superficial uma realidade de estudo promissora e realizável, utilizando as técnicas atrás citadas, apesar do seu funcionamento não estar completamente compreendido à altura.

Entre 1970 e 1985 os estudos de aperfeiçoamento dos dispositivos de onda superficial centraram-se na compreensão da propagação e estudo das características dos materiais. Os objectivos destes estudos eram os seguintes:

- Obtenção de um acoplamento electromecânico eficaz
- Diminuição dos efeitos relacionados com a difracção
- Diminuição da variação da velocidade de propagação das ondas de superfície com a temperatura
- Baixa atenuação
- Baixa dispersão
- Redução das não linearidades
- Conseguir que a propagação das ondas não seja afectada pelos componentes do SAW, transdutores interdigitais por exemplo

Uma conclusão interessante destes estudos foi a possibilidade de encontrar alguns materiais capazes de satisfazer em simultâneo a maioria das exigências atrás apresentadas. Verificou-se que para a quase totalidade das aplicações práticas, a propagação das ondas de superfície nos dispositivos SAW é ideal, não é necessário compensar a atenuação, dispersão ou difracção. Os efeitos das não linearidades são desprezáveis para os níveis de potência utilizados na maior parte das aplicações. Já os efeitos da temperatura necessitam geralmente de um tratamento cuidado. Verificou-se que os materiais com muitas propriedades atractivas, tem geralmente uma estabilidade com a temperatura pobre, desadequada à maior parte das aplicações relacionadas com processamento de sinal, a destacar os filtros e osciladores. Um exemplo de um desses materiais é o niobato de lítio.

Um material piezoeléctrico é anisotrópico sendo na prática um cristal ou uma cerâmica. Verificou-se nos estudos sobre materiais, que os fenómenos diminutos de difracção nos dispositivos SAW são fortemente influenciados pela anisotropia dos materiais.

O coeficiente de temperatura de atraso num SAW, que define a variação da velocidade de propagação com a temperatura, pode ser obtido, calculando as velocidades utilizando as constantes elásticas apropriadas para dois ou mais valores da temperatura. Entretanto, definiu-se que o coeficiente de temperatura do atraso, que envolve também a expansão do material com a temperatura, é o parâmetro adequado para a caracterização desta característica em materiais a utilizar nos SAW. Por exemplo para o quartzo, existe uma orientação, para a qual, os efeitos da temperatura na velocidade de propagação e expansão do material se cancelam. Este caso foi apresentado em 1970 por Schulz, Matsinger e Holland no artigo '*Temperature dependence of surface acoustic wave velocity on alpha-quartz*', a orientação em causa, é um corte com rotação de $42,75^\circ$ em relação ao eixo Y, conhecido como corte ST (Stable Temperature) com propagação ao longo do eixo X. Este fenómeno tem aplicação directa e óbvia, em dispositivos críticos como osciladores e filtros de alto desempenho. Mais tarde foi demonstrado que o coeficiente de temperatura poderá ser ajustado para zero em diversos materiais, se o ângulo de corte for escolhido estrategicamente.

Como já foi dito, foi também demonstrado nos estudos sobre materiais a empregar como substrato que a atenuação é baixa, sendo desprezável na maior parte dos materiais de estrutura cristalina, desde que se garanta um elevado grau de polimento da superfície do material onde a frente de onda se irá propagar.

Tendo especial atenção a características como o acoplamento electromecânico, difracção e estabilidade com a temperatura, foram identificados e catalogados, um conjunto de materiais promissores e respectivos cortes. Porém, nem todos os materiais estudados foram explorados da mesma forma, por questões práticas relacionadas com custos ou disponibilidade. Os materiais introduzidos com mais sucesso em filtros económicos para receptores TV foram o tantalato de lítio, filmes de óxido de zinco, o tetraborato de lítio e alguns substratos de safira.

Até ao início dos anos 90, os SAW foram ampla e exclusivamente utilizados na electrónica de rádio frequência e no processamento de sinal nos seguintes dispositivos:

- Filtros de compressão de impulso, os quais foram a razão inicial para o estudo dos SAW, que permitem num pequeno espaço implementar conceitos que melhoram a performance dos sistemas de radar

- Filtros passa-banda largamente utilizados em receptores, geralmente utilizados nos amplificadores de frequência intermédia, substituindo de forma eficaz e económica os transformadores sintonizados de frequência intermédia, com bobines e condensadores
- Linhas de atraso utilizadas em radares ou no processamento de sinal
- *Duplexers*, esta aplicação dos dispositivos SAW foi marcante na miniaturização dos telemóveis
- Filtros de alto rendimento para RF utilizados nos telemóveis

A partir da segunda metade dos anos 90, os dispositivos de onda superficial já são fabricados em massa, essencialmente para a indústria da electrónica e telecomunicações, com destaque para os telemóveis. Já existem bastantes materiais devidamente caracterizados para utilizar como substrato e bons modelos matemáticos para os transdutores interdigitais e propagação das ondas de superfície. Surge então, grande entusiasmo à volta de um novo e promissor campo de aplicação para os SAW, como sensores ou dispositivos de identificação remota passivos [6]. Tomando partido da capacidade do transdutor interdigital, em transformar sinais eléctricos em ondas mecânicas que se propagam a baixa velocidade e vice-versa, foi demonstrado que estes dispositivos conseguem, retransmitir uma versão linearmente distorcida do impulso rádio frequência com que foram irradiados. Os dispositivos SAW irão funcionar e devolver parte da energia do impulso com que são irradiados.

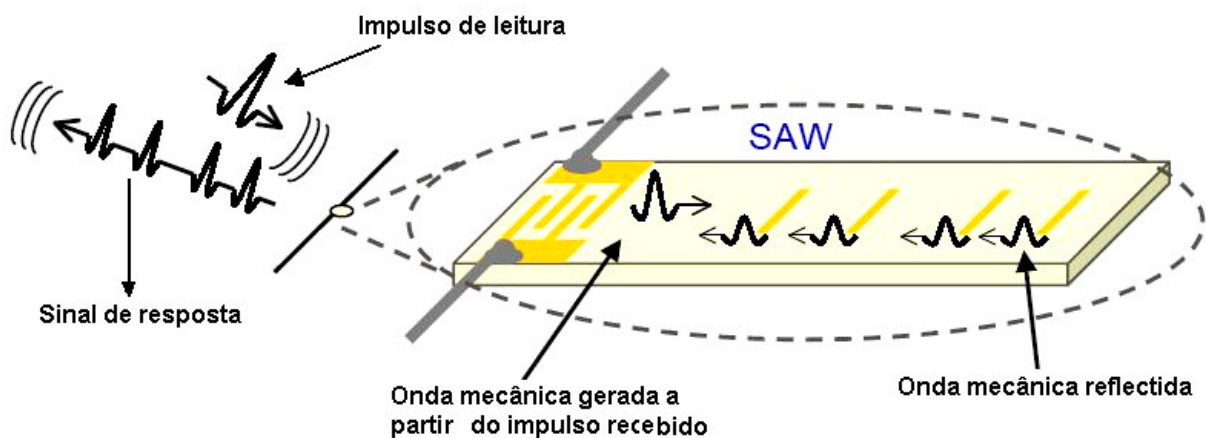


Figura 5 – Ilustração do funcionamento dos SAW, como sensores passivos.

Até à actualidade têm sido estudadas aplicações dos SAW quer em ambiente gasoso quer líquido, como dispositivos de identificação e na medição de grandezas físicas como, força, deslocamento, pressão, binário e humidade [1]. Mais recentemente foram publicados artigos que relatam a aplicação de dispositivos na indústria aeroespacial [3] e de defesa [26].

2.2 Ondas de superfície, descrição e propagação

2.2.1 Introdução

Nos estudos feitos inicialmente por Lord Rayleigh sobre ondas de superfície, foi tido em conta um meio isotrópico, sólido e semi-infinito. As aplicações abordadas neste texto envolvem o conhecimento do comportamento deste tipo de ondas em meios sólidos, elásticos e anisotrópicos, com propriedades piezoeléctricas.

É de salientar que a principal razão para o interesse no estudo e aplicação das ondas elásticas se prende com o facto de estas se propagarem a uma velocidade muito mais baixa do que as ondas electromagnéticas. Valores típicos para a velocidade de propagação das ondas elásticas nos sólidos situam-se entre os 1500m/s e cerca de 12000m/s, sendo esta gama menor no caso das ondas de superfície, com valores de velocidade típicos entre os 1500m/s e os 4000m/s. Estas velocidades de propagação são 10^5 vezes menores do que as velocidades de propagação das ondas electromagnéticas, o que implica que também os comprimentos de onda para as ondas elásticas serão menores do mesmo factor.

No texto que se segue serão apresentados de forma breve os vários tipos de ondas elásticas que se podem propagar em meios sólidos, sendo em seguida, abordadas de forma mais detalhada as ondas superfície em meios sólidos perfeitamente elásticos, com propriedades piezoeléctricas. As ondas elásticas são abordadas em detalhe em textos relacionados com a física dos meios contínuos ou em [7], [8] e [9].

2.2.2 Tipos de ondas elásticas em sólidos

Na figura 6 são apresentados, de forma sumária vários tipos de ondas, que se podem propagar em meios elásticos. Nos meios sólidos mais simples, infinitos, não piezoelétricos e perfeitamente elásticos, nos quais somente se propagam as ondas elásticas transversais e longitudinais, a pressão normal (força por unidade de área) e o deslocamento normal das partículas, são descritos simplesmente pela lei de Hooke, [9] página 247,

$$T_{ij} = c_{ijkl} \times S_{kl}, \quad (2.1)$$

onde T_{ij} é a pressão ou força por unidade de área, que actua segundo a direcção da coordenada i , numa superfície da qual a normal é paralela ao eixo x_i e S_{kl} é a componente do deslocamento normal das partículas definida por,

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_k}{dx_l} + \frac{du_l}{dx_k} \right), \quad (2.2)$$

u_k , representa o deslocamento de uma partícula na direcção k e x_l é a coordenada da posição l . As quantidades c_{ijkl} equivalem às constantes de rigidez elástica, para o meio em questão, também conhecidas por módulo de Young.

A partir da lei de Hooke e da equação da força de Newton, pode ser obtida a equação das ondas elásticas em meios contínuos, sólidos elásticos, ver exemplo em [9] páginas 246 a 250,

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_l}, \quad (2.3)$$

na qual ρ representa a densidade do meio.

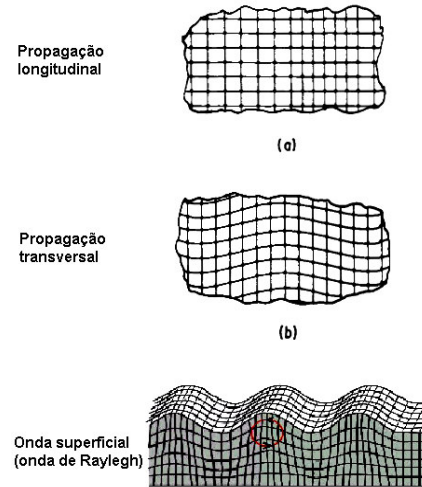


Figura 6 – Os vários tipos de ondas elásticas que se podem propagar nos sólidos, em (a) propagação longitudinal, (b) propagação transversal e em (c) onda superficial ou de Rayleigh.

A velocidade de propagação das ondas elásticas pode ser determinada, substituindo as expressões para o deslocamento das partículas que constituem o material na equação de onda apresentada, pela velocidade de fase em função da direcção de propagação no meio sólido. Obtendo-se então,

$$v = \sqrt{\frac{c_{ijkl}}{\rho}}, \quad (2.4)$$

a velocidade de propagação das ondas transversas, é tipicamente metade ou menos, do que a velocidade de propagação das ondas elásticas longitudinais.

Se o sólido tiver características piezoeléctricas, a equação de onda baseada na lei de Hooke é substituída pelas seguintes equações de estado piezoeléctrico:

$$T_{ij} = c_{ijkl}S_{kl} - e_{ijm}E_m \quad (2.5)$$

$$D_n = e_{nkl}S_{kl} + \epsilon_{nm}E_m \quad (2.6)$$

Onde e_{ijm} são os elementos da tensão piezoeléctrica para o material, E_m representa o campo eléctrico, D_n é a deformação eléctrica e ϵ_{nm} equivale à matriz da permissividade dieléctrica para o material em questão (ver [9] paginas 135, 136, 222 e 223). Num sólido com características piezoeléctricas, a onda elástica é acompanhada por uma onda de campo eléctrico, passando a velocidade da onda a depender das propriedades elásticas, piezoeléctricas e dieléctricas deste. O meio comporta-se como sendo mais rígido, como consequência da energia potencial adicional resultante do acoplamento piezoeléctrico, o que faz com que as velocidades de propagação aumentem como resultado deste “endurecimento piezoeléctrico”.

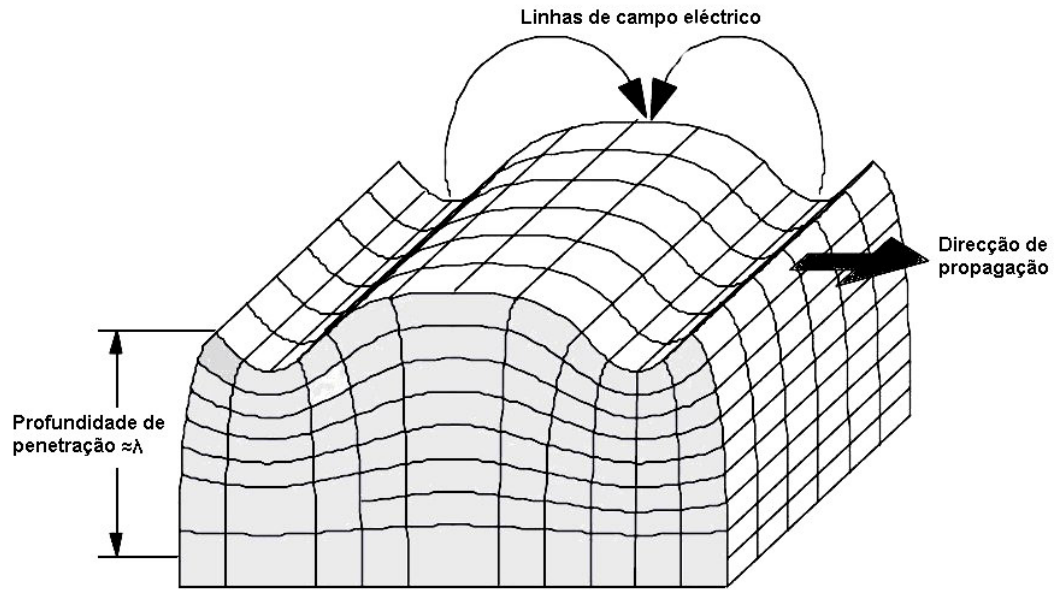


Figura 7 – Propagação de uma onda de superfície num material piezoelétrico.

A rigidez elástica passa a ser aumentada de um valor,

$$c_{piezo} = c(1 + K^2), \quad (2.7)$$

com,

$$K^2 = \frac{e^2}{c\epsilon}, \quad (2.8)$$

o termo K^2 , conhecido como o coeficiente de acoplamento electromecânico, representa a capacidade de um determinado material piezoelétrico, transformar uma deformação mecânica em energia eléctrica e vice versa, logo o máximo valor que K^2 pode tomar é um, este termo será tratado com mais detalhe adiante neste capítulo, em conjunto com o efeito piezoelétrico.

2.2.3 Ondas de superfície em materiais piezoelétricos

Uma onda de superfície move-se sobre uma superfície de um material sólido, ao passar, a frente de onda força as partículas que constituem a estrutura do material a moverem-se em círculo ou elipse no sentido de propagação da frente de onda. Chamam-se ondas de superfície, porque a amplitude do movimento das partículas diminui com a profundidade do material, sendo o seu movimento desprezável para profundidades superiores a um comprimento de onda, [2], [7] e [8].

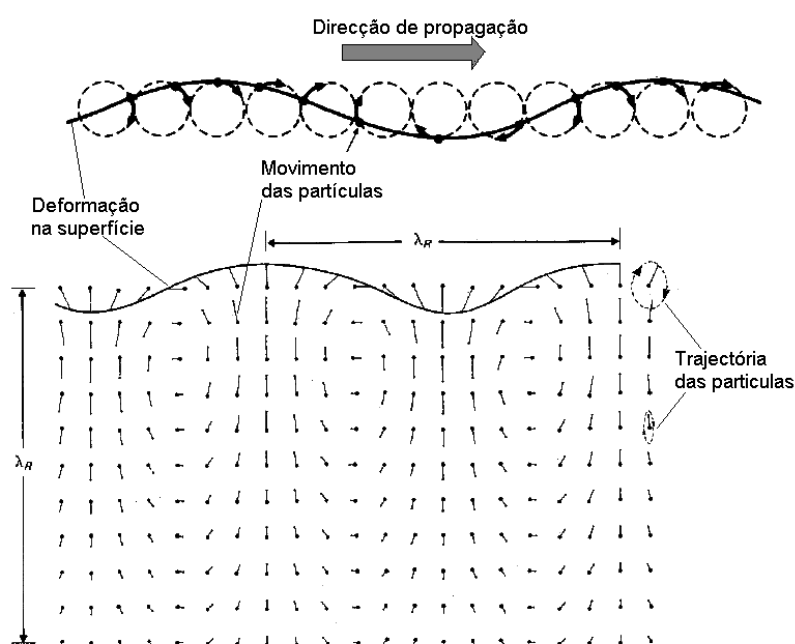


Figura 8 – Ilustração da propagação de uma onda de superfície e deslocamento das partículas num sólido.

Como nos sólidos a velocidade de propagação das ondas de superfície é muito mais baixa do que a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas, em substratos isoladores com características piezoelétricas podem ser usadas equações baseadas na electrostática, nas quais não são tidas em conta as grandezas magnéticas, sendo apenas requerida a continuidade do campo eléctrico tangencial e a componente normal do deslocamento eléctrico. De [7] destacam-se os seguintes pontos da análise da propagação de ondas de superfície em materiais piezoelétricos:

- Uma onda de superfície que se propague num sólido com características piezoelétricas, é acompanhada dentro e fora do sólido por um campo elétrico
- A existência de piezoelectricidade num material resulta num aumento da velocidade de propagação das ondas em relação à velocidade de propagação, prevista para o mesmo material sem a existência da mesma
- A velocidade de propagação das ondas de superfície, passa a depender da piezoelectricidade, elasticidade e características dielétricas do material. Como consequência, a variação da velocidade de propagação passa a estar dependente da sensibilidade destas propriedades à temperatura

Outro fenómeno que é importante abordar é a atenuação sofrida pelas ondas de superfície quando se propagam num sólido. Nas aplicações em que este estudo se centra, são geralmente utilizados materiais com estruturas cristalinas, neste tipo de materiais a atenuação é bastante baixa, sendo grandemente afectada pelo grau de polimento ou rugosidade da superfície, descontinuidades, imperfeições ou falta de pureza do material.

Tabela 1 – Características de propagação das ondas de superfície em alguns dos materiais mais utilizados como substrato em SAW, retiradas de [2] e [7].

Orientação do Material ¹⁾		v _{ph} (m/s)	k ² (%)	TCD (ppm/°C)	Atenuação (db/μs)		
Corte	Prop.				433 MHz	2.45GHz	
Quartzo	ST	X	3158	0.1	0	0.75	18.6
	37°rotY	90°rotX	5094	≈ 0.1	0	2)	2)
LiNbO ₃	Y	Z	3488	4.1	94	0.25	5.8
	41°rotY	X	4750	15.8	69	2)	2)
	128°rotY	X	3980	5.5	75	0.27	5.2
LiTaO ₃	36°rotY	X	4220	≈6.6	30	1.35	20.9
	X	112°rotY	3301	0.88	18	-	-

1) Corte, orientação da matéria cristalina em relação à normal à superfície

2) dependente da metalização

Até agora os resultados apresentados estão baseados em sólidos perfeitamente elásticos, porém as amplitudes das ondas geradas podem ser elevadas a um ponto em que, nos sólidos reais a relação esforço deformação passe a ser não linear. Nesse caso as consequências para a propagação das ondas são o aparecimento de harmónicos da frequência da onda gerada e, em consequência, fenómenos de interferência e atenuação.

Estes fenómenos são por vezes utilizados intencionalmente em dispositivos SAW destinados à mistura, modulação ou limitação de sinais eléctricos.

Embora este texto esteja focado na aplicação das ondas de superfície em dispositivos SAW, estas são aplicadas e utilizadas em outros fins como a caracterização de materiais, verificação de defeitos em superfícies, detecção de fissuras e outras imperfeições em materiais. As ondas de superfície de baixa frequência geradas pelos terremotos são também utilizadas pelos geofísicos, para a caracterização do interior do planeta terra, ou então são geradas (utilizando cilindros vibradores ou explosões controladas) para a caracterização e detecção de camadas de deposição dos solos para estudos geológicos.

2.3 Efeito piezoeléctrico e materiais utilizados como substrato nos SAW

2.3.1 Introdução

A piezoelectricidade foi descoberta em 1880 por Jacques e Pierre Curie (à direita), eles conseguiram descrever a capacidade de certos materiais em desenvolver uma carga eléctrica proporcional a uma força e consequente deformação mecânica e vice-versa. Alguns materiais de estrutura cristalina têm comportamento piezoeléctrico, dada a sua estrutura molecular única (não simétrica), demonstrando este efeito, apenas ao longo de um único eixo.



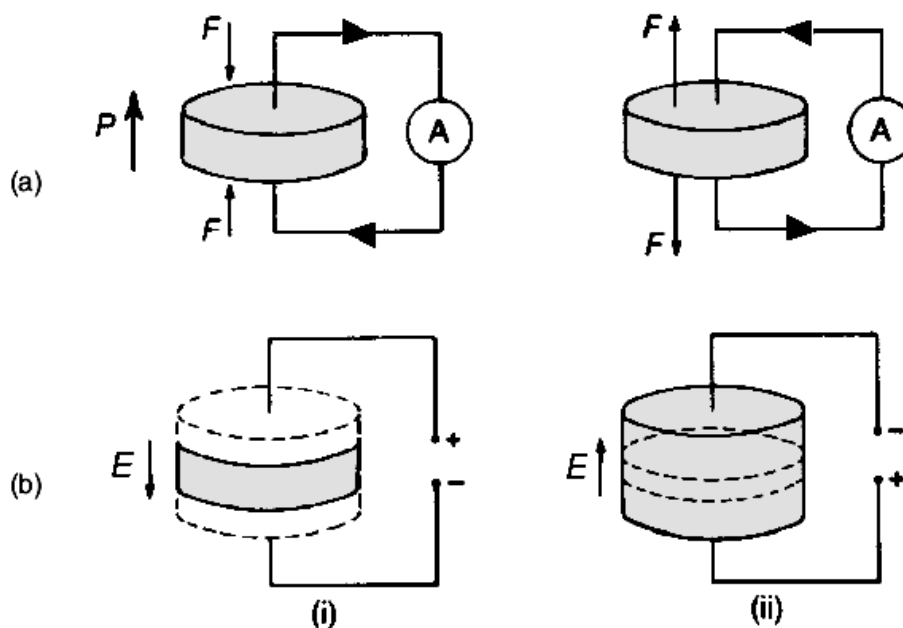


Figura 9 – Efeito piezoelétrico (a) directo, (b) indirecto: (i) contração, (ii) expansão.

Alguns materiais tem características piezoelétricas naturais, noutros como por exemplo os materiais ferroelétricos, essas características podem ser induzidas aplicando-lhe temporariamente campos eléctricos elevados com o material perto da temperatura de Curie. Em [11] existe uma descrição detalhada deste fenómeno físico.

2.3.2 Efeito piezoelétrico

Na figura que se segue é dado o exemplo do comportamento piezoelétrico, numa partícula de uma estrutura cristalina de quartzo. Estruturas semelhantes à apresentada na figura são chamadas não centro-simétricas, neste tipo de estruturas se traçarmos um vector imaginário entre o centro da estrutura e um dos átomos ou partículas que compõem a molécula ou estrutura (ponto O da figura 10) com uma determinada carga, o vector com sentido contrário na mesma direcção irá apontar obrigatoriamente para uma carga com polaridade oposta.

Com o cristal em repouso, todos os átomos se encontram à mesma distância do ponto O e não é verificado nenhum fenómeno de polarização. Porém se for aplicada uma

força de expansão ou compressão, a estrutura irá sofrer uma deformação, as cargas deixam de estar à mesma distância do ponto O e o material passa a apresentar polarização.

O efeito inverso é também verificado, ou seja se em vez de uma força, for aplicada uma diferença de potencial a um material com características piezoelétricas, verifica-se uma deformação no material, correspondendo à expansão ou contracção do material, consoante a polaridade da diferença de potencial for aplicada.

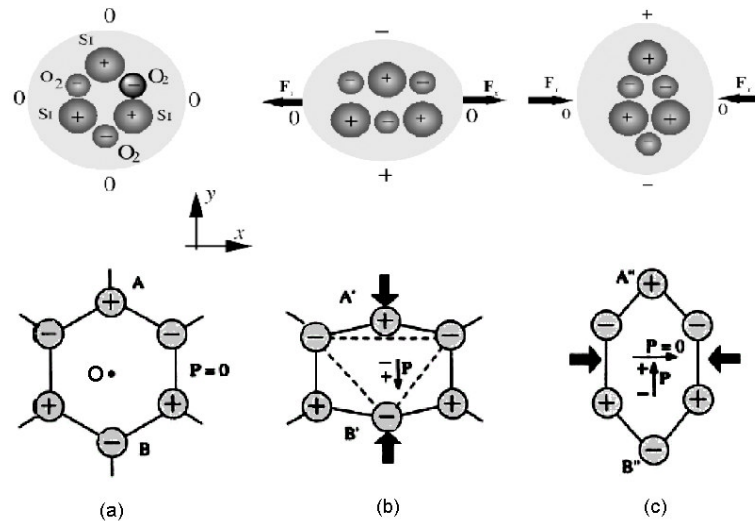


Figura 10 – Comportamento piezoelétrico do quartzo (SiO₂), três moléculas ligadas em estrutura não centro-simétrica, (a) cristal em repouso sem polarização, (b) compressão do cristal, (c) expansão do cristal.

O comportamento piezoelétrico num cristal não condutor sujeito a um esforço elástico ou uma diferença de potencial está descrito em [11] e é dado por:

$$x_{ij} = s_{ijkl}X_{kl} + d_{mij}\epsilon_m + M_{mnij}\epsilon_m\epsilon_n, \quad (2.9)$$

em que x_{ij} são as componentes da força elástica, s_{ijkl} é a correspondente tensão elástica, X_{kl} são as componentes da força, d_{mij} são coeficientes piezoelétricos, M_{mnij} é a tensão electroestrutiva, ϵ_m e ϵ_n são as componentes do campo eléctrico. Se desprezarmos os efeitos de segunda ordem e assumindo que o material está em repouso, a força elástica pode ser dada por:

$$x_{ij} = d_{mij}\epsilon_n \quad (2.10)$$

Esta equação define o efeito piezoelétrico contrário, ou seja quando induzida uma força num material piezoelétrico, esta vai ser directamente proporcional ao campo eléctrico gerado no material. Desta forma representa-se a variação de forma que o material sofre, quando lhe é aplicado um campo eléctrico.

O efeito piezoelétrico directo é dado por:

$$P_m = d_{mij} X_{ij} \quad (2.11)$$

Onde P_m representa a polarização eléctrica gerada. Esta expressão representa a carga gerada pelo material em função da tensão mecânica aplicada ao material.

Um parâmetro importante na caracterização de materiais piezoelétricos é o coeficiente de acoplamento electromecânico, mais conhecido por K^2 , este representa a eficiência de um determinado material piezoelétrico, ao converter uma deformação causada por uma tensão mecânica em carga eléctrica,

$$K^2 = \frac{\text{Energia mecânica ou eléctrica debitada pelo material}}{\text{Energia mecânica ou eléctrica fornecida ao material}},$$

é grande a importância deste coeficiente no estudo e desenvolvimento de dispositivos SAW, no fundo representa a eficiência com que um determinado material é capaz de converter um sinal eléctrico, na energia mecânica associada a uma onda de superfície e vice-versa. Salientando-se que K^2 , a velocidade de propagação da onda de superfície no substrato e a estabilidade do material com a temperatura, são os parâmetros mais importantes na selecção de materiais para substrato em dispositivos SAW. Como os valores de K^2 são geralmente muito baixos, costumam ser expressos em percentagem. Em termos dos parâmetros piezoelétricos do substrato K^2 pode ser escrito da seguinte forma:

$$K^2 = \frac{e^2}{\epsilon c} \quad (2.12)$$

Onde c representa a constante piezoelétrica do material e ε é a permissividade dielétrica do material. O parâmetro K^2 pode também ser obtido experimentalmente [2], utilizando a relação:

$$K^2 = \frac{2\Delta v}{v} \quad (2.13)$$

Onde $|\Delta v|$ representa a variação da velocidade de propagação de uma onda de superfície que se propaga num material piezoelétrico e choca com uma película de filme metálico de alta condutividade.

O efeito piezoelétrico é utilizado numa grande variedade de aplicações tais como:

- Osciladores de cristal
- Geradores de ondas acústicas e altifalantes
- Actuadores de micro deslocamentos
- Actuadores em válvulas e sistemas de injeção comandados electricamente
- Sistemas de ignição por arco eléctrico passivos (por exemplo em esquentadores e fogões)
- Mini motores ultra sónicos, utilizados nas câmaras fotográficas e no posicionamento de objectos
- Transdutores e sensores de várias grandezas

2.4 Materiais piezoelétricos e materiais utilizados como substrato em dispositivos de onda superficial

Existe uma grande variedade de cristais que exibem propriedades piezoelétricas. Muitos são utilizados em várias aplicações nas quais é utilizada a piezoelectricidade, tais como osciladores de alta exactidão e estabilidade, radares, SAW, actuadores, sensores e motores. Desses cristais constam o quartzo (SiO_2), niobato de lítio (LiNbO_3), tantalato de lítio (LiTaO_3), sulfato de lítio e o sal de Rochelle (descoberto em 1880 e muito utilizado em transdutores electroacústicos). Recentemente, foi descoberto que alguns cristais ferroelétricos e cerâmicas podem exibir boas propriedades piezoelétricas em certas aplicações, quando comparados com outros materiais.



Figura 11 – Cristal de quartzo na sua forma natural. Este mineral abundante na natureza foi explorado em vários pontos do país. Por exemplo em Penalva do Castelo.

Os materiais mais utilizados em trabalhos científicos e na produção industrial de SAW são o quartzo, o niobato de lítio e o tantalato de lítio. O quartzo é o mineral mais abundante na Terra (aproximadamente 12% do seu volume). Possui estrutura cristalina composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício, SiO_2), figura 10. Nos cristais de quartzo, alguns cortes apresentam boa estabilidade térmica e a inexistência de coeficiente de atraso de primeira ordem com a temperatura (por exemplo o corte ST eixo de propagação X) e um elevado ponto de Curie (cerca de 573°C). Porém o quartzo tem um fraco coeficiente de acoplamento electromecânico K^2 (cerca de 0,1%, ver tabela 1), o que significa, uma baixa eficiência na geração e conversão de ondas superficiais em sinais eléctricos. Apesar de ter um valor baixo de K^2 , o quartzo é muito abundante na natureza sendo a sua obtenção e tratamento económicos, quando comparado com outros materiais. O quartzo é também produzido artificialmente para aplicações onde sejam exigidos elevados níveis de pureza.

O quartzo conseguiu uma forte posição em aplicações de baixo custo, ou onde seja exigida uma excelente estabilidade térmica. O estudo do comportamento piezoelétrico e aplicação do niobato de lítio começaram durante a década de 1960. Estes materiais, quando utilizados os cortes correctos, tem valores de K^2 bastante mais elevados do que o quartzo,

4,1% para o niobato de lítio e cerca de 6,6% para o tantalato de lítio (ver tabela 1). Isto faz com que estes materiais sejam utilizados em aplicações que exijam perdas baixas e elevada largura de banda, radiofrequência e processamento de sinal, mas que não sejam sensíveis a variações da temperatura. Os valores dos coeficientes de atraso com a temperatura para estes dois últimos materiais são consideráveis, variando entre 18ppm/°C e 94ppm/°C, como são pouco estáveis com a temperatura, são boas opções se utilizados em sensores de temperatura [1], [6] e [12].

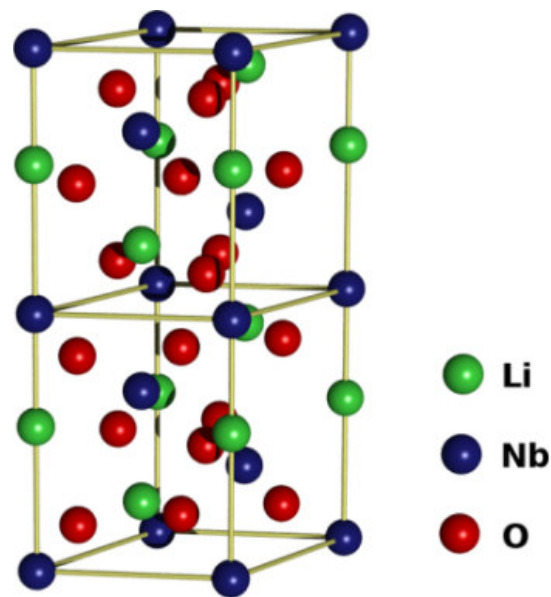


Figura 12 – Estrutura hexagonal de um cristal de niobato de lítio LiNbO_3 .

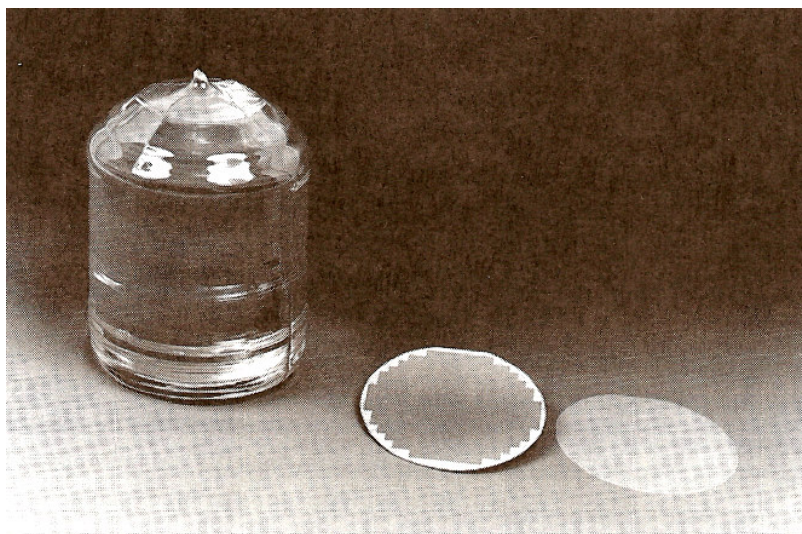


Figura 13 – Cristal de tantalato de lítio obtido artificialmente.

2.5 Geração de ondas de superfície, transdutores interdigitais e reflectores

2.5.1 Geração de ondas de superfície

Até à presente data, foram desenvolvidas várias formas de gerar e detectar ondas de superfície em substratos sólidos. Portanto, a selecção do melhor método de transdução de ondas superfície depende muito da aplicação. Por exemplo em trabalhos de investigação ou de pesquisa de materiais, transdutores com uma eficiência moderada e uma pequena largura de banda, poderão ser suficientes. Já em aplicações como os dispositivos de onda superficial, existem requisitos de largura de banda e eficiência relevantes que são impostos. Em muitas aplicações é também necessário que os meios de transdução sejam reversíveis, ou seja um transdutor deve ser capaz de transformar sinais eléctricos em ondas de superfície e vice-versa. Existem várias formas de transdução descritas em [7], das quais se destaca:

- Piezoeléctrica figura 14 (b), consiste na utilização de filas de eléctrodos espaçados e ligados estrategicamente (transdutores interdigitais). Este método permite gerar e receber ondas de superfície
- Mecânica figura 14 (a), utilizando uma agulha ou lâmina como meio de excitação directamente na superfície
- Térmica, aquecimento/arrefecimento alternado da superfície (baixa largura de banda)
- Piezoresistiva, o esforço provocado pela onda, faz variar a resistência do material num transistor de efeito de campo

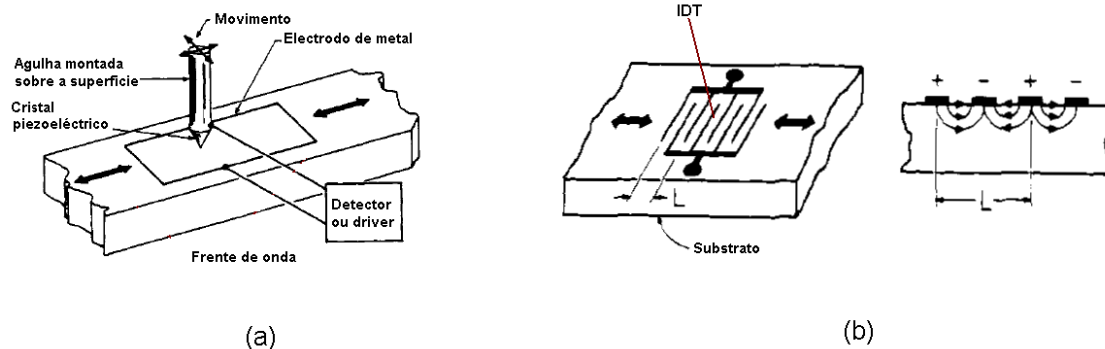


Figura 14 – Exemplos de duas formas de gerar ondas de superfície, (a) mecanicamente e em (b) utilizando um material piezoeléctrico e um transdutor interdigital.

Gerar ondas de superfície utilizando transdução piezoeléctrica, é o método por excelência para a criação/recepção de frentes de onda em dispositivos SAW. Este método baseia-se na utilização de estruturas intercaladas de eléctrodos metálicos sobre um substrato piezoeléctrico. Desde que as estruturas sejam devidamente desenhadas é possível conceber transdutores de ondas de superfície que respeitem requisitos de largura de banda, eficiência e comprimento da frente de onda predefinidos, utilizando modelos matemáticos que aproximam o funcionamento dos mesmos.

2.5.2 Transdutores interdigitais

Em 1965 fruto dos esforços desenvolvidos no estudo e desenvolvimento de dispositivos de onda superficial, foi apresentado em [13] por White e Voltmer, o transdutor interdigital uniforme, capaz de acoplar directamente um gerador de sinal e um substrato piezoeléctrico.

A configuração do transdutor interdigital uniforme, retirada do artigo de White & Voltmer, é apresentada na figura 16 (a), este é constituído por uma série de eléctrodos metálicos, geralmente fabricados em alumínio ou cobre, de comprimento fixo, ligados alternadamente a duas linhas, responsáveis pela alimentação ou ligação dos eléctrodos que constituem transdutor ao mundo exterior. O período p , figura 16(a), representa a distância entre duas franjas consecutivas ligadas à mesma linha de

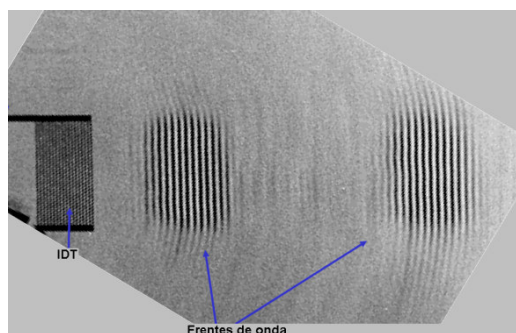


Figura 15 – Vista ao microscópio de duas frentes de onda geradas por um transdutor interdigital num substrato piezoeléctrico.

alimentação, que é igual ao comprimento da onda de superfície gerada, à frequência do sinal eléctrico que alimenta o transdutor. A largura das franjas e o espaçamento entre duas franjas consecutivas deverá ser aproximadamente um quarto do comprimento de onda, figura 17. Este transdutor funciona de forma recíproca ou seja é capaz de transformar um sinal eléctrico numa frente de onda e vice-versa, figura 16 (b).

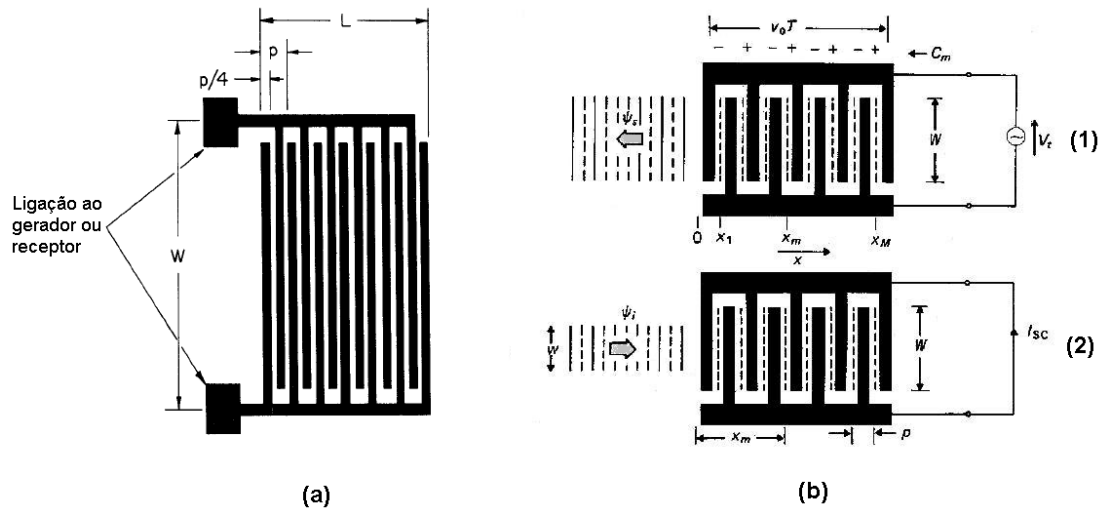


Figura 16 – Estrutura do transdutor interdigital uniforme em (a) retirada de [13], (b) representação da dualidade do transdutor interdigital.

Para que a transdução seja possível é necessário que a estrutura metálica esteja deposta directamente na superfície do material piezoeléctrico. O processo de transdução pode ser facilmente compreendido observando a figura 18, o campo eléctrico gerado pelo sinal que alimenta o transdutor vai provocar compressão/expansão do material piezoeléctrico de que é feito o substrato, consoante a polaridade das franjas. Pode ser associada uma onda de superfície, a esta série de compressões e expansões intercaladas do material piezoeléctrico, correspondendo cada zona de compressão ou expansão do material a metade do comprimento da onda gerada. O resultado deste processo é a formação de duas frentes de onda com comprimento proporcional ao número de franjas. Em seguida as frentes de onda irão propagar-se pelo substrato em sentidos opostos. Conclui-se então que um transdutor interdigital uniforme pode ser visto como um sistema de três portos, com dois portos acústicos e um eléctrico.



Figura 17 – Pormenor do layout das franjas metálicas.

Quando é aplicado um sinal eléctrico a um transdutor interdigital, são geradas duas frentes de onda de superfície a partir dos portos acústicos, que se deslocam em sentidos opostos. De forma similar, quando uma frente de onda alcançar um porto acústico de um transdutor interdigital, partirá uma frente de onda semelhante (com comprimento de onda e velocidade iguais mas menor amplitude) do outro porto acústico e será gerado um sinal eléctrico entre as duas linhas de alimentação ligadas às franjas [14]. Este princípio é a base de desenvolvimento dos sensores e dispositivos de identificação remota passivos baseados em SAW, que serão apresentados mais à frente neste texto.

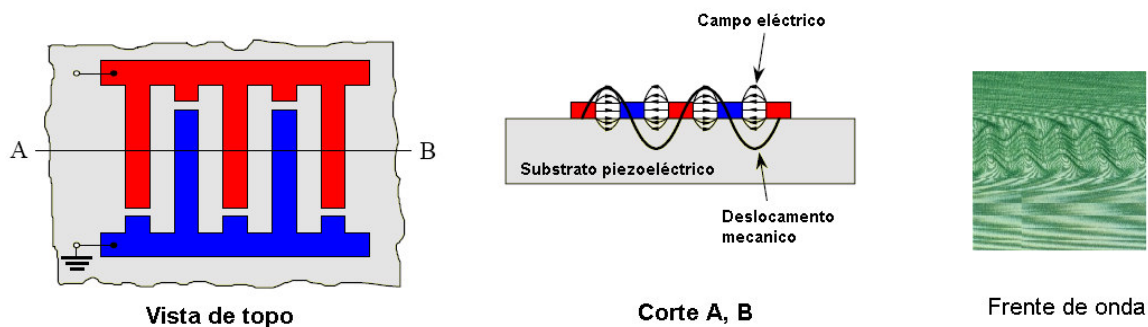


Figura 18 – Funcionamento do transdutor interdigital uniforme.

Uma questão que deve ser clarificada no contexto do desenho dos transdutores interdigitais para dispositivos SAW é o comprimento de onda. Deve distinguir-se o comprimento de onda da radiação electromagnética que alimenta o transdutor, do comprimento da onda de superfície que é gerada num substrato à mesma frequência. No desenho de um transdutor interdigital é considerado o comprimento de uma onda de superfície à frequência do sinal eléctrico que alimenta o transdutor. Tendo presente a expressão,

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (2.14)$$

é mais claro compreender para as aplicações vulgares utilizando feixes entre os 100MHz e os 2,5GHz, que no caso das ondas electromagnéticas, que se propagam à velocidade da luz estamos a falar de comprimentos de onda da ordem dos centímetros, já as ondas de superfície às mesmas frequências se vão propagar em meio sólido com velocidades da ordem dos 3000m/s, o que implica comprimentos de onda no substrato da ordem dos

nanómetros. Logo o desenho de um transdutor interdigital para uma determinada frequência f , será imposto pelo comprimento da onda de superfície que se desloca no substrato com velocidade característica v à mesma frequência.

2.5.3 Desenvolvimentos nos transdutores interdigitais

Foi investida uma grande quantidade de trabalho no desenvolvimento, teste e aplicação das estruturas dos transdutores interdigitais uniformes, figura 19 (a). Estes possuem como já foi descrito, dois eléctrodos por comprimento de onda, esta configuração fornece um meio de transdução eficiente, mas é afectada por reflexões parasitas, principalmente quando se trabalha a frequências acima de 800MHz e tem o inconveniente em algumas aplicações, de gerar duas frentes de onda. O que significa, que da parte da energia fornecida ao transdutor que é transformada em energia mecânica, metade propagar-se-á num sentido e a outra metade em sentido oposto. Se numa determinada aplicação todos os transdutores ou reflectores estiverem localizados apenas de um lado, ou no caso de interessar transmitir ou receber uma frente de onda apenas num sentido, os transdutores interdigitais mais adequados são os unidireccionais mono fase, apresentados na figura 19 (b). Este tipo de transdutor estimula a formação de uma frente de onda de superfície preferencialmente numa direcção, concentrando desta forma a maior parte da energia mecânica numa direcção.

O funcionamento do transdutor interdigital uniforme figura 19 (a), principalmente quando o seu tamanho aumenta muito, é prejudicado com reflexões múltiplas entre as franjas e capacidades parasitas, que distorcem a sua resposta em termos de largura de banda. Para minimizar esse tipo de problemas foi desenvolvido o *split finger transducer* ou transdutor de franja aberta, figura 19 (c). Esta variante do transdutor interdigital foi apresentada em 1972 e passou a ser muito popular no desenho de filtros.

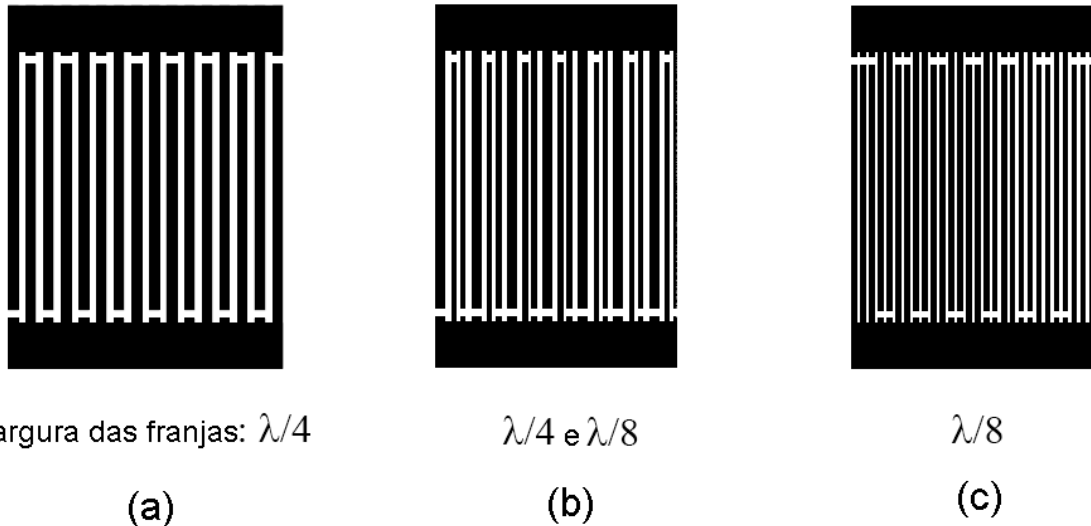


Figura 19 – Transdutores interdigitais, (a) uniforme, (b) unidireccional e (c) de franja aberta “Split Finger”.

O transdutor interdigital uniforme e as suas variantes são os meios de transdução mais aplicados em dispositivos SAW. Neste tipo de transdutor o comprimento das franjas é constante. Durante a década de sessenta, quando os esforços no desenvolvimento dos SAW estavam centrados na sua aplicação em filtros e processamento de sinal, foi desenvolvida uma estrutura não uniforme [14], figura 20, na qual o comprimento das franjas varia segundo uma determinada forma ou envolvente. Quando é aplicado um impulso de tensão a um transdutor interdigital não uniforme é gerado um grupo de ondas de superfície com a forma da envolvente às franjas que compõem o transdutor, quando esse grupo de ondas atinge o transdutor interdigital de recepção, é produzida uma tensão que varia segundo a envolvente (forma) do transdutor gerador.

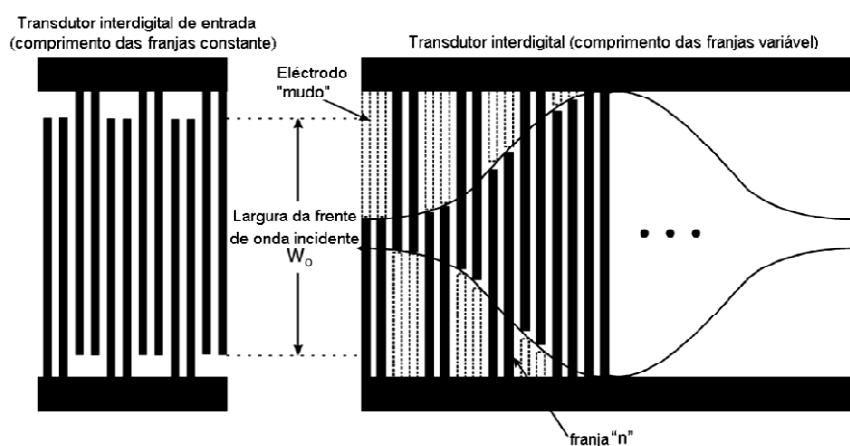


Figura 20 – Geometria típica de um filtro com um transdutor interdigital de franja aberta à esquerda e um transdutor com comprimento de franja variável à direita.

Este tipo de transdutor é amplamente utilizado em filtros passa banda e de compressão de pulso, uma vez que permite que seja obtida a função de transferência desejada para o filtro.

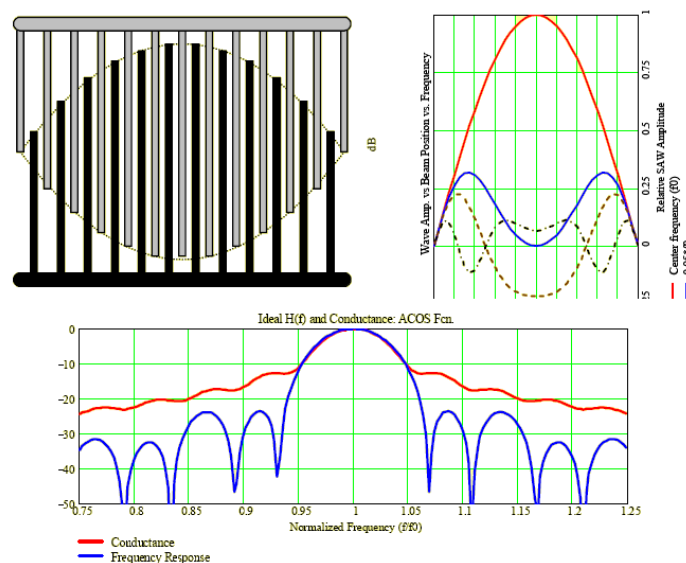


Figura 21 – Função de transferência e amplitude de onda a frequência normalizada, para um transdutor interdigital não uniforme.

A utilização de transdutores não uniformes gera um problema, a diminuição da velocidade da frente de onda quando se propaga entre os eléctrodos metálicos. Se forem considerados os eléctrodos de comprimento variável do transdutor não uniforme apresentado na figura 20, é fácil compreender que a parte central da frente de onda que intercepte este transdutor vai ter a oposição de mais eléctrodos, logo irá abrandar mais do que a componente lateral da frente de onda, que encontra menos eléctrodos, o que irá gerar uma distorção apreciável na frente de onda ao fim desta ultrapassar o transdutor não uniforme. Para evitar este problema são muitas vezes utilizados os chamados eléctrodos “mudos” (ver figura 20 linhas a tracejado), que não afectam as propriedades eléctricas do transdutor, mas obrigam a velocidade de propagação de uma frente de onda que achesse um transdutor deste tipo a manter-se uniforme [14].

Existe outra variante à estrutura dos transdutores interdigitais uniformes na qual é a largura e periodicidade das franjas que varia segundo um determinado padrão. Desta forma é possível a obtenção de filtros com diferentes larguras de banda, nos quais o tempo de atraso varia de acordo com a frequência. Um exemplo de aplicação desta técnica é os filtros

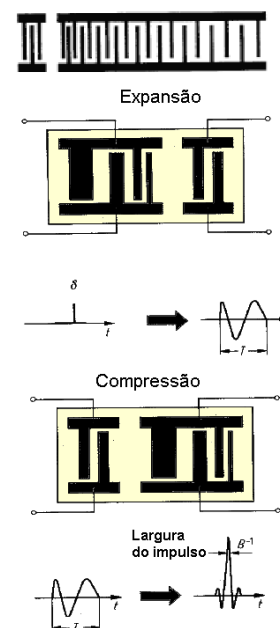


Figura 22 – Aplicação de transdutores interdigitais modificados na compressão ou expansão de impulsos.

de compressão ou expansão de impulsos, utilizados em aparelhos de radar. A expansão de impulso consiste em criar um impulso mais largo do que o de excitação, com uma sinusóide de saída em que a frequência vai aumentando. É possível com este transdutor efectuar o processo inverso, ou seja as frequências são atrasadas exactamente a mesma quantidade de tempo de modo a que a energia das várias frequências seja libertada toda ao mesmo tempo criando um impulso estreito de maior amplitude.

2.5.4 Reflectores

Foram apresentadas várias estruturas para transdutores interdigitais capazes de gerar ondas de superfície num substrato piezoeléctrico de forma eficaz. Não menos importante principalmente quando são desenvolvidos dispositivos de onda superficial para aplicação como osciladores ou sensores passivos, são as estruturas utilizadas como reflectores. Estes permitirão, que uma frente de onda gerada no substrato de um dispositivo SAW regresse ao transdutor interdigital de origem, onde será transformada num sinal eléctrico que será novamente irradiado para a atmosfera por uma antena. Os desenhos mais utilizados para estas estruturas são apresentados na figura 24. Os vários tipos de reflectores, eléctrodos de largura $\lambda/4$ abertos ou em curto-circuito, vários eléctrodos ligados em par e do tipo *Chevron* são amplamente discutidos na literatura. Todos os reflectores apresentados podem produzir problemas com a uniformidade da resposta de um SAW. Cada reflector, ao ser atingido por uma frente de onda, reduz a amplitude da frente de onda transmitida principalmente por conversão de parte da onda de superfície incidente, numa onda elástica não superficial. Se for tido em conta o exemplo de um dispositivo SAW com vários reflectores em série, figura 23, é fácil verificar que a amplitude dos sinais reflectidos vai variar com a quantidade de reflectores existentes, estando o numero reflectores utilizáveis limitado à capacidade de obtenção de uma resposta mensurável no receptor [16].

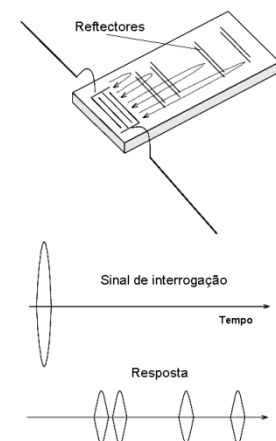


Figura 23 –

Funcionamento de um sensor baseado em SAW.

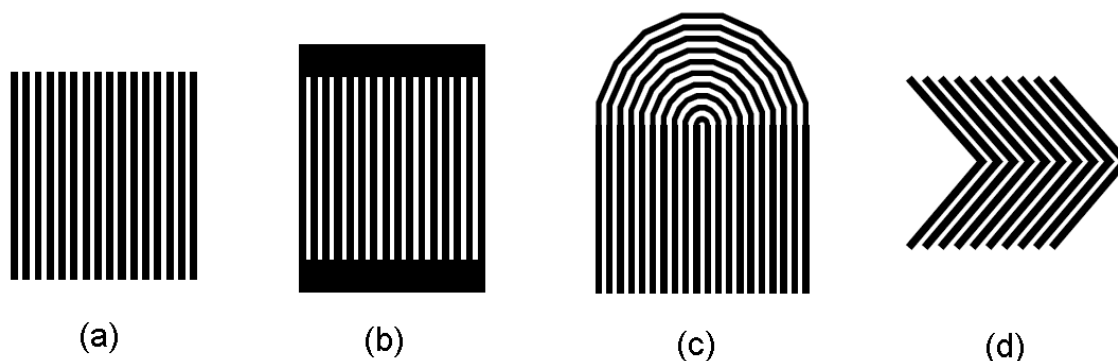


Figura 24 – Reflectores, estruturas típicas utilizadas em SAW, (a) uniforme aberto, (b) uniforme em curto circuito, (c) eléctrodos ligados em par e (d) tipo *Chevron*.

Imagine-se o dispositivo de SAW ilustrado na figura 25 (a), se for visto como uma linha de transmissão, na qual temos um transdutor interdigital ligado a uma antena que funciona como gerador, a frente de onda criada por esse transdutor irá propagar-se até encontrar outros transdutores interdigitais. Um fenómeno interessante acontece, quando um transdutor interdigital é atingido por uma frente de onda, se a este for posto em curto-circuito, será verificada uma pequena reflexão com amplitude desprezável, podendo nesta fase dizer-se que a linha de transmissão se encontra adaptada. Caso o transdutor interdigital esteja em aberto, este terá a estrutura de um reflector em aberto e será gerada uma frente de onda reflectida. Este fenómeno pode ser aplicado, no desenvolvimento de etiquetas de identificação configuráveis utilizando um jogo de comutadores e cargas apropriadas às impedâncias dos transdutores interdigitais colocados ao longo do substrato, que poderão ou não funcionar como reflectores, consoante a posição dos comutadores.

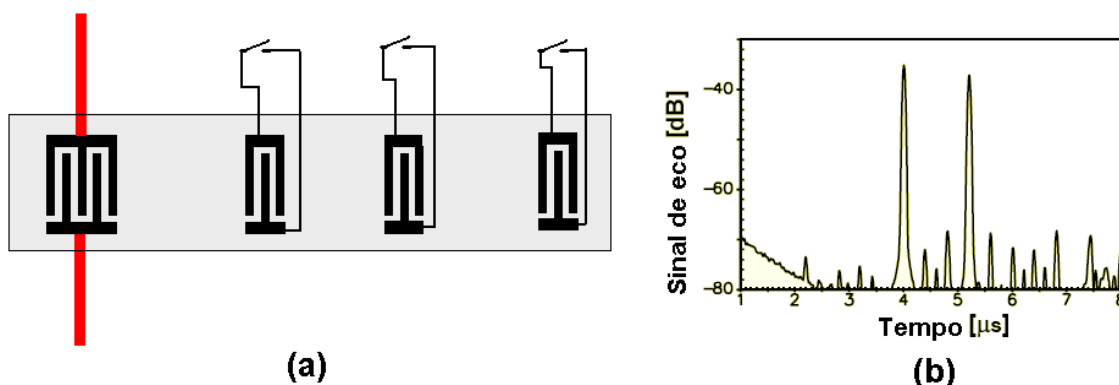


Figura 25 – Dispositivo SAW visto como uma linha de transmissão, que poderá estar adaptada ou desadaptada funcionando como reflector ou não. Em (b) ilustração da situação em que o último reflector se encontra em curto-circuito.

2.6 - Aplicações práticas dos SAW

2.6.1 Introdução

Os dispositivos de onda superficial começaram a ser estudados na década de 60, como na altura os esforços estavam centrados na sua aplicação como linhas de atraso em filtros de compressão e expansão de impulso utilizados nos aparelhos de radar. Com os desenvolvimentos e aperfeiçoamentos nos transdutores interdigitais, reflectores e na caracterização dos substratos, começaram a emergir aplicações em electrónica de radiofrequência, osciladores, filtros e *duplexers*. Actualmente a sua principal aplicação é em filtros e *duplexers*, embora tenham sido apresentadas em 1979 as primeiras aplicações como sensores [18], existe actualmente um interesse renovado na aplicação deste tipo de dispositivos como sensores de várias grandezas físicas e identificadores remotos [1], dada a sua facilidade de construção, fiabilidade, robustez, capacidade de funcionar sem alimentação e baixo custo de produção em grande escala, utilizando técnicas e infra-estruturas disponíveis para a produção de circuitos integrados. No entanto a aplicação prática dos SAW requer conhecimento específico sobre os materiais a utilizar como substrato, ondas de superfície, técnicas de desenho e modelos matemáticos das estruturas.

Nesta secção serão apresentados alguns exemplos das principais aplicações dos SAW, sendo dedicada especial atenção para algumas soluções comerciais. No capítulo três deste texto, dedicado ao estado da arte, serão apresentadas outras aplicações recentes, estas baseadas em artigos técnico-científicos.

2.6.2 Processamento de sinal e rádio frequência

Como já foi dito, os SAW começaram por ser utilizados em linhas com atraso variável com a frequência em filtros de compressão ou expansão de impulso em aparelhos de radar os quais já foram abordados neste texto. Introduzidos na década de 70 e até hoje os dispositivos SAW têm sido utilizados com grande sucesso, como filtros passa-banda, em

receptores de rádio, TV, telemóveis e outros dispositivos de recepção [19], constituindo uma solução simples e muito económica. Evitam, na maior parte dos casos, a necessidade de utilização dos tradicionais transformadores sintonizados, que carecem de ajuste prévio e são muito mais volumosos. Neste tipo de aplicação os SAW conseguem:

- Características semelhantes às dos filtros LC convencionais, sem necessidade de ajuste
- Poupança de tempo e recursos nas linhas de montagem
- Construção de preamplificadores e amplificadores de frequência intermédia mais compactos e estáveis com a temperatura
- Dispositivos embalados utilizando polímeros moldados, mais económicos e menos sensíveis à humidade

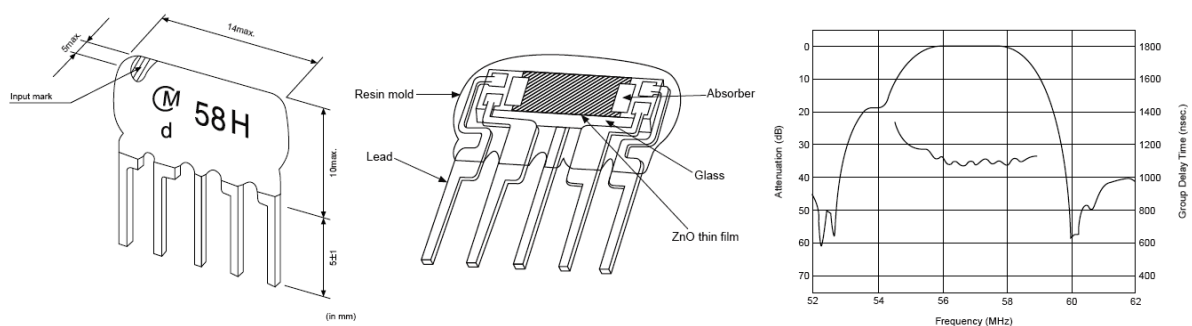
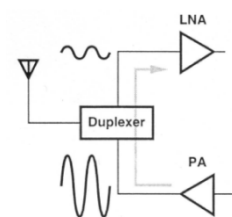


Figura 26 – Exemplo de um filtro passa banda comercial fabricado pela Murata, para andares de frequência intermédia em televisores, baseado na tecnologia dos SAW.

Os filtros baseados em SAW são hoje amplamente utilizados em comunicações móveis e redes sem fios, existindo implementações desde os 800 MHz até aos 2,4GHz. É de salientar que, em grande parte, foi graças aos SAW que foi possível a miniaturização de telemóveis, PC's de bolso com ligação a redes WLAN e outros dispositivos de comunicação sem fios. Tais filtros são amplamente discutidos em [2]. Nestes dispositivos costuma estar presente um *duplexer*, responsável pela comutação de sinais entre a antena e os andares de saída e entrada do dispositivo. Actualmente existem *duplexers* baseados na tecnologia dos SAW, que permitem o desempenho das funções sem alimentação, funcionamento em *full-duplex* e com boa qualidade de filtragem. A principal desvantagem dos *duplexers*



**Figura 27 –
Funcionamento de
um *duplexer*.**

baseados em SAW e um aumento da atenuação imposta aos sinais com o aumento da qualidade das performances exigidas como filtro ao dispositivo.

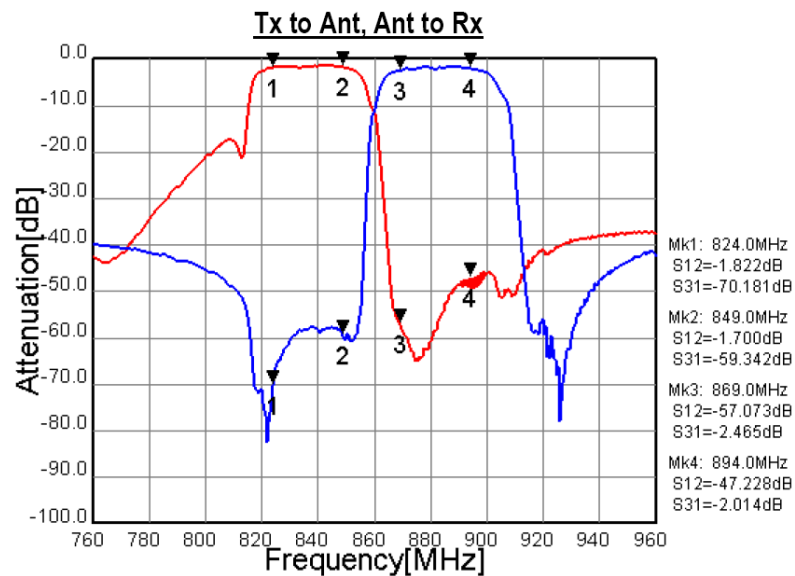


Figura 28 – Curva de resposta de um *duplexer* fabricado pela Fugitso para a banda dos 824MHz a 894MHz

Os osciladores baseados em SAW podem trabalhar a frequências da ordem dos GHz, têm as vantagens de produzir sinais com grande pureza à frequência fundamental, baixo consumo, tamanho reduzido e utilizando circuitos simples. Actualmente existem no mercado dispositivos SAW que permitem a realização de osciladores estáveis com a temperatura (com temperaturas de operação entre 40°C e 125°C), para frequências altas (desde 100MHz até alguns GHz), de reduzidas dimensões e para os mais variados tipos de aplicações como dispositivos de rádio comando, osciladores locais e transmissores. Na figura 29, são apresentados os desenhos típicos para os osciladores. Para que um dispositivo SAW possa funcionar como oscilador, basta que incorpore um transdutor interdigital uniforme e dois reflectores separados do transdutor interdigital uma distância que seja múltipla de um comprimento de onda.

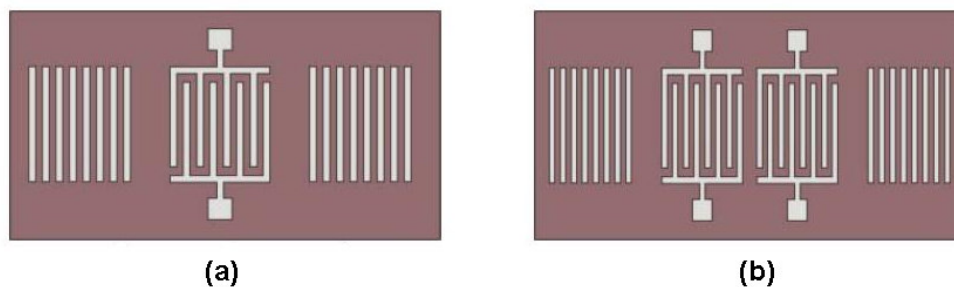


Figura 29 – Desenhos típicos para osciladores SAW, (a) oscilador de um porto e (b) oscilador de dois portos.

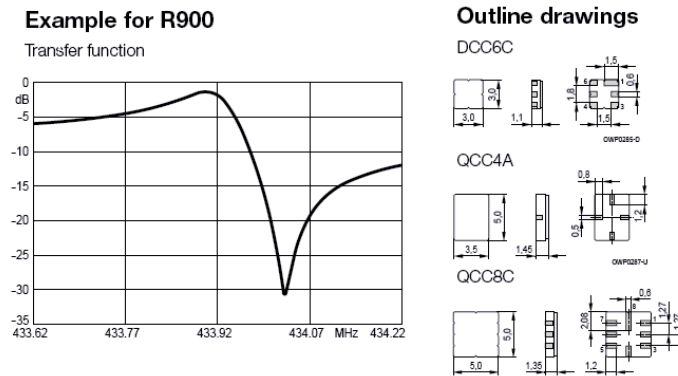


Figura 30 – Função de transferência de um oscilador compacto para 432,92MHz baseado em SAW fabricado pela EPCOS, o substrato utilizado é o quartzo e a tolerância são 50kHz, retirado de [24].

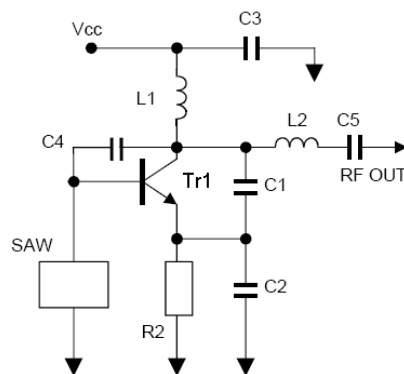


Figura 31 – Circuito eléctrico para um oscilador utilizando um dispositivo SAW de um porto, com saída adaptada

2.6.3 Identificadores e sensores remotos passivos

Se um dispositivo SAW, com um transdutor interdigital ligado a uma antena e um ou mais reflectores, for irradiado por um impulso de sinal rádio à sua frequência fundamental, é possível receber ecos desse dispositivo passado algum tempo (tipicamente nanossegundos ou alguns milissegundos), dada a reciprocidade do funcionamento do transdutor interdigital e uma vez que a velocidade de propagação de uma onda superficial a uma determinada frequência num sólido é tipicamente 10^5 vezes inferior que a velocidade de propagação de uma onda electromagnética no ar. Este principio pode ser utilizado para a leitura de etiquetas de identificação ou na medição de grandezas físicas [1], [4], [6] e [20] de forma remota utilizando dispositivos SAW. A vantagem decisiva da utilização de dispositivos de onda superficial como sensores ou identificadores, é o facto destes funcionarem de forma passiva, ou seja sem necessitar de alimentação externa, uma vez que estes modulam

e devolvem parte da energia com que são irradiados. A capacidade de um dispositivo de onda superficial devolver parte da energia com que foi irradiado está directamente dependente do coeficiente de acoplamento electromecânico K^2 do substrato utilizado. Outras vantagens da utilização dos SAW como sensores são a possibilidade de instalação em locais de difícil acesso ou ambientes perigosos sem necessitar de manutenção periódica.

Estão a emergir aplicações dos SAW na indústria automóvel, transportes e caminhos-de-ferro, em sistemas de medição de binário, medição da pressão em pneus, controlo de acesso e identificação. Hoje em dia é vulgar a inclusão de sistemas de controlo de tracção nos veículos, mas para que o controlo seja realmente eficaz é necessário medir o binário em um ou vários pontos do sistema de tracção do veículo e calcular, utilizando os algoritmos adequados, a retroacção a aplicar ao sistema. A medição do binário pode ser feita utilizando dois dispositivos SAW como indicado na figura que se segue.

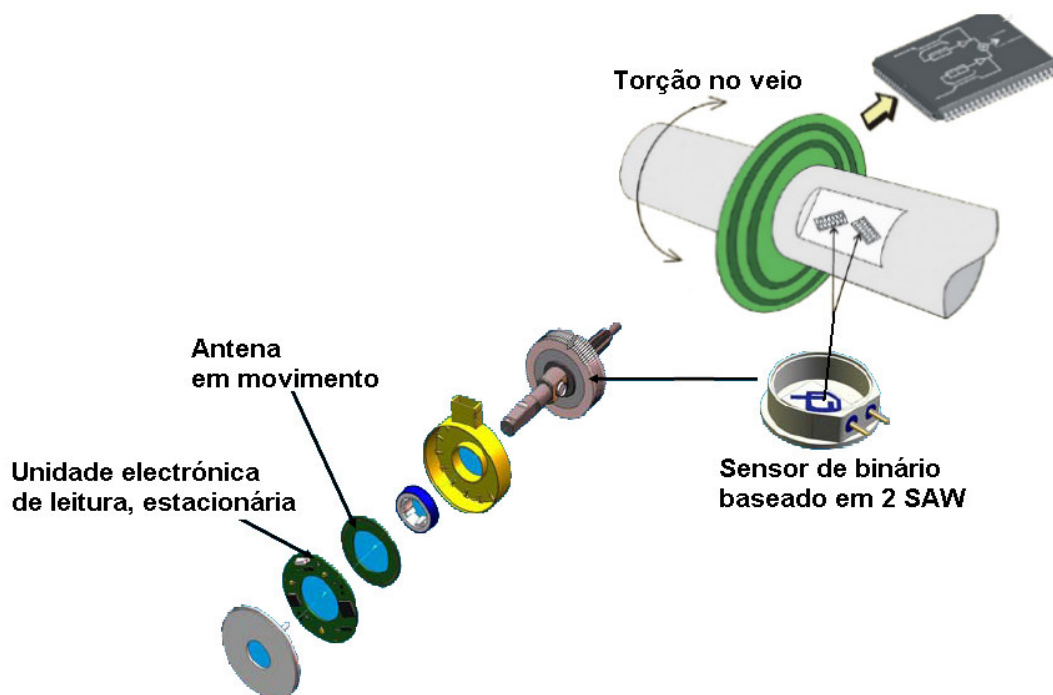


Figura 32 – Montagem e funcionamento de um sensor de binário produzido pela Honeywell [21]

Nesta aplicação, os dispositivos SAW são montados a $+45^\circ$ e -45° em relação ao eixo do veio de transmissão para poder aproveitar de forma mais eficaz as componentes da expansão e compressão que sofre uma superfície quando sujeita a uma torção. A frequência de ressonância dos dispositivos SAW é dependente da torção sofrida pelo material. Os sensores estão ligados a uma antena solidária com o veio em rotação, que é irradiada por uma

unidade electrónica estática montada na proximidade, não havendo qualquer contacto físico ou alimentação eléctrica entre os sensores e a unidade de leitura. Estes sensores operam à frequência de 433 MHz, são baseados num substrato de quartzo pela sua boa estabilidade térmica e baixo custo. Foram tidos cuidados especiais com as ligações externas (*bond-lines*) entre os transdutores interdigitais o mundo exterior, para evitar fenómenos de histerese relacionados com a variação da resistência ou fadiga das ligações, uma vez os dispositivos estão sujeitos a tensões e deformações variáveis. Os dispositivos são constituídos por um transdutor interdigital uniforme ladeado por dois reflectores com 200 franjas, com período de aproximadamente $2\mu\text{m}$, no fundo a estrutura apresentada é a estrutura de um vulgar ressoador baseado em SAW figura 33 (a), como se pode ver pela resposta do sensor a um impulso, que quando irradiado entra em oscilação com um decaimento uniforme relacionado com as perdas de energia do dispositivo, figura 33 (b) e (c). A espessura da metalização é de aproximadamente $0,1\mu\text{m}$ mantendo a relação $h/\lambda \approx 1\%$ para evitar a criação de reflexões parasitas nas franjas do transdutor interdigital e reflectores.

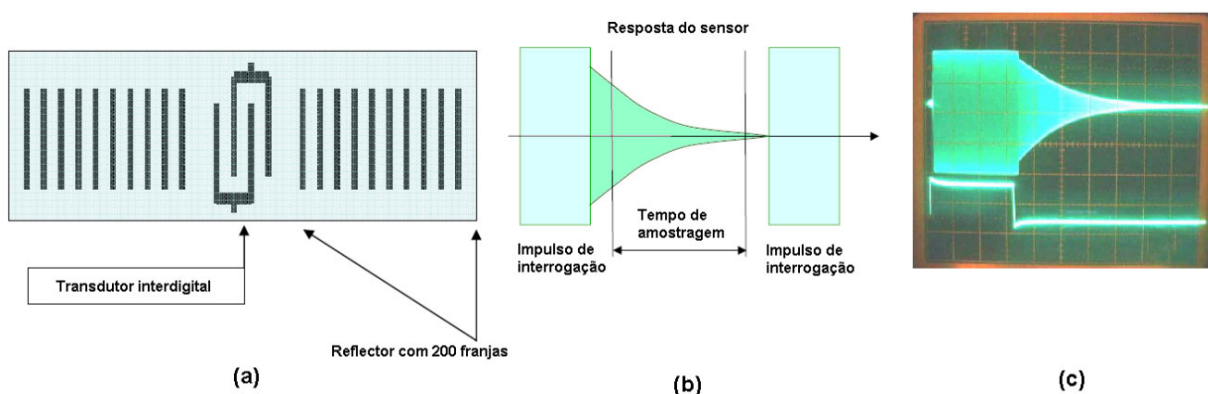


Figura 33 – Sensor de binário baseado em SAW [21], em (a) desenho do dispositivo, (b) funcionamento e (c) captura de uma resposta em osciloscópio.

Existem também algumas aplicações dos SAW ligadas ao sector automóvel ainda em fase de desenvolvimento como a medição da pressão em pneus a referir mais à frente.

Outra aplicação importante para os dispositivos SAW é a sua utilização como etiquetas de identificação. Para além da vantagem óbvia do funcionamento sem alimentação, as etiquetas de identificação baseadas em SAW tem a vantagem de poderem ser interrogadas milhares de vezes por segundo, o que as torna uma boa solução na identificação de objectos que se movem com rapidez. Uma etiqueta de identificação

baseada em SAW é basicamente constituída por um transdutor interdigital e uma área de codificação. A área de codificação pode ser desenhada de duas formas, utilizando vários reflectores separados ou então, ligar na mesma linha vários transdutores interdigitais que irão formar o código, figura 34. Entre o transdutor interdigital ligado à antena e a zona de codificação, existe uma separação maior, com o objectivo de se obter um atraso adicional no sinal de resposta para evitar as interferências dos ecos ambientais relacionados com o sinal de leitura.

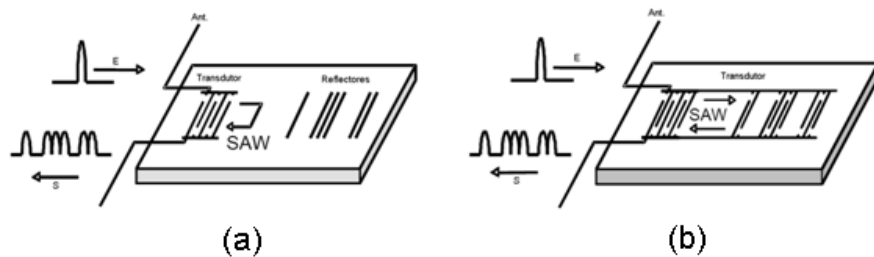


Figura 34 – Estruturas utilizadas nas etiquetas de identificação baseadas em SAW, em (a) reflectores separados e em (b) vários transdutores ligados na mesma linha.

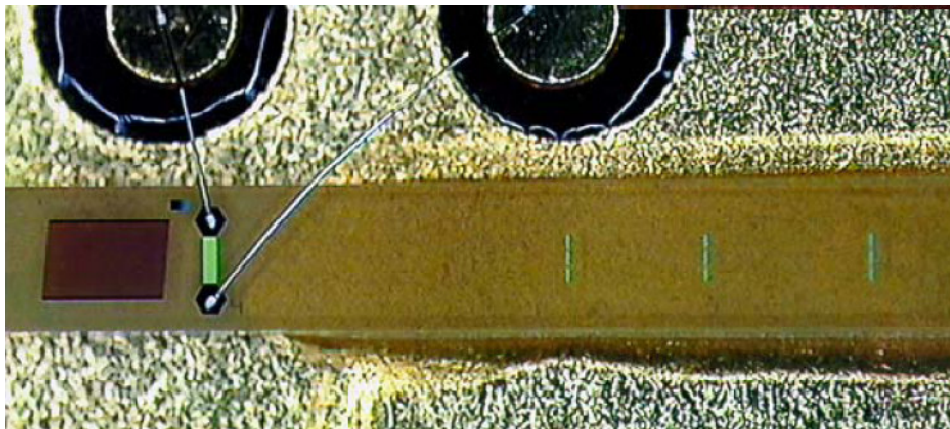


Figura 35 – Foto ampliada de uma etiqueta de identificação, notar as ligações do transdutor principal ao mundo exterior e a zona de codificação constituída por reflectores separados, construída num substrato de LiNbO_3 .

Existem algumas soluções comerciais de sistemas de identificação RFID, baseados em SAW. As distâncias de leitura variam entre os 5m e os 10m nos sistemas para a banda ISM dos 433,05MHz a 434,79MHz e 1m a 2m na banda ISM dos 2,4GHz a 2,5GHz, [1], [20], [22] e [23]. As aplicações destes produtos estão focadas na identificação de objectos, no controlo automático de processos fabris e identificação de veículos em movimento. Os códigos utilizados na maioria das aplicações comerciais (actualmente duas) variam entre os 13bit e os 20bit. Na figura 36 é apresentada uma aplicação de um sistema de identificação

automática de carruagens de comboio, baseado em SAW, que opera na frequência de 2,45GHz. Este produto permite a instalação de um sistema de controlo e monitorização do tráfego com baixos custos, sem qualquer tipo de manutenção nas etiquetas de identificação.

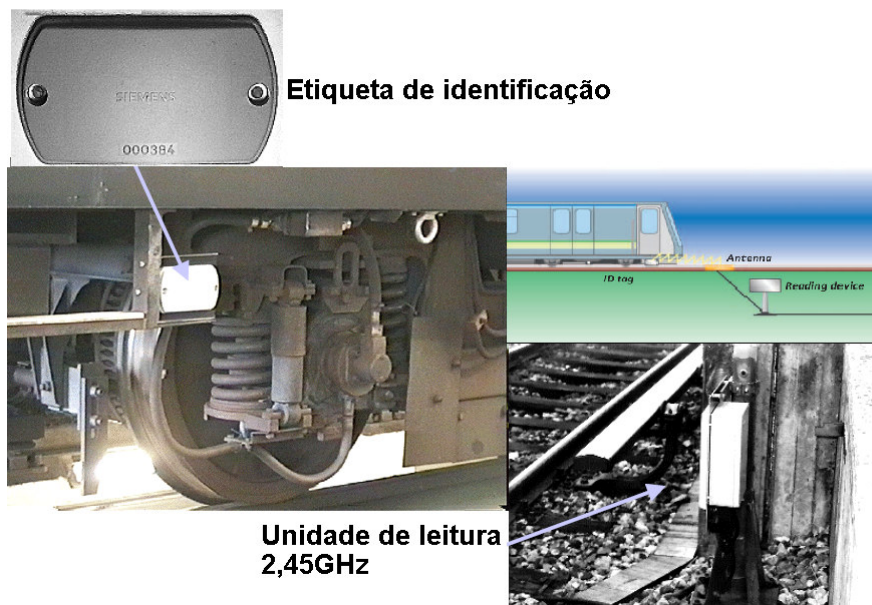


Figura 36 – Sistema SOFIS [25], *Surface Acoustic Wave Identification System*, aplicado na identificação de carruagens nos comboios sub urbanos de Munique, Alemanha.

Outra área de aplicação comercial para os transdutores interdigitais e ondas de superfície são os ecrãs sensíveis ao toque, conhecidos por *touchscreens*. Este tipo de ecrã é hoje amplamente utilizado no comércio, máquinas industriais, máquinas de diversão, telemóveis e computadores de bolso. Nestes ecrãs as ondas de superfície são transmitidas e guiadas, por um conjunto de transdutores interdigitais e reflectores, criando uma matriz invisível sobre o ecrã. Quando um dedo toca o ecrã numa determinada zona, deixa de haver transmissão das ondas de superfície permitindo a detecção da posição de contacto, que será enviada para o controlador específico para processamento posterior. Embora seja esta a tecnologia mais avançada para ecrãs sensíveis ao toque, estes continuam susceptíveis a alguns danos provocados pelo meio ambiente. Este tipo de ecrã tem como superfície de acabamento, uma camada de vidro, onde estão montados na periferia transdutores de ondas de superfície responsáveis por gerar as coordenadas X e Y. O controlador do ecrã alimenta os transdutores com um sinal eléctrico de 5MHz, que o irão converter em ondas de superfície que se propagarão no vidro que cobre a superfície do ecrã. A frente de onda é direccionada, por um conjunto de reflectores dispostos no lado oposto da superfície, para os transdutores de recepção, que irão transformar de novo, as ondas de superfície em sinais

eléctricos. No fundo é feito o mapeamento da área do ecrã, ao tocar no ecrã com o dedo ou um objecto, será absorvida parte ou mesmo a totalidade da frente de onda de superfície que viaja sobre ele. O sinal recebido é comparado com o previsto no mapeamento inicial e a mudança é reconhecida possibilitando o cálculo da coordenada. Este processo é feito de forma independente para o eixo X e para eixo Y, figura 37. Como as ondas de superfície se propagam em vidro, este tipo de ecrã não é susceptível a fenómenos de desgaste, permitindo a estes dispositivos, durabilidade e brilho mais elevados.

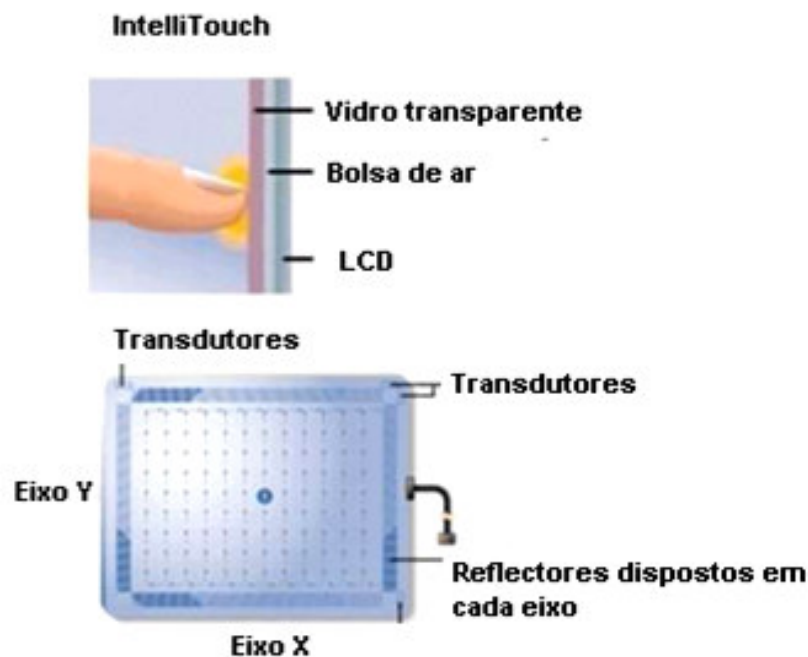


Figura 37 – Funcionamento de um ecrã sensível ao toque, baseado na tecnologia dos SAW.

3

Estado da arte



Depois de apresentados os conceitos, funcionamento e alguns exemplos de aplicações práticas dos dispositivos SAW. Este capítulo destina-se a apresentar com base em estudos e artigos científicos recentes, aplicações emergentes para os dispositivos SAW.

3.1 Introdução

Os dispositivos SAW são comercializados há mais de 50 anos, actualmente o principal cliente continua a ser o mercado das telecomunicações. Porém, a recessão económica dos últimos anos afectou também este mercado, restringindo de alguma forma o crescimento na produção de dispositivos SAW. A adaptação da indústria tende para explorar novos segmentos de aplicação para os dispositivos SAW, incluindo aplicações na indústria automóvel, medicina, biotecnologias, automação de processos, aeroespacial e defesa. Onde como já foi dito, os dispositivos SAW podem ser utilizados vantajosamente, como sensores passivos, etiquetas de identificação ou actuadores, [1], [2], [5], [16], [12] e [26].

Com a estagnação do mercado, os preços dos produtos tendem a baixar, obrigando os produtores a um esforço adicional na pesquisa e aplicação de materiais, mais económicos e abundantes, a adoptar técnicas de projecto (simuladores e ferramentas de desenho assistido por computador) e mecanismos de produção mais eficientes e rápidos, aproveitando os avanços nas técnicas de desenho, obtenção de matéria-prima e de produção dos circuitos integrados. Existem também avanços interessantes na implementação de dispositivos SAW em circuitos integrados [17], o que é muito vantajoso para a indústria das telecomunicações. Nas próximas secções deste capítulo serão apresentadas algumas aplicações emergentes dos SAW, a maior parte delas ainda em fase de estudo ou desenvolvimento.

3.2 Aplicações emergentes dos SAW

Com as novas oportunidades de mercado, estão a surgir várias aplicações para os dispositivos SAW como sensores ou etiquetas. Embora grande parte das aplicações ainda esteja em fase de desenvolvimento ou introdução no mercado, existe um grande entusiasmo na matéria.

3.2.1 Utilização de SAW's como sensores

Nos últimos anos, vários autores com relevo para o grupo de Reindl e Pohl publicaram uma série de artigos científicos, onde a utilização de dispositivos SAW como sensores foi demonstrada para a medição várias grandezas físicas como a pressão, força, binário, deslocamento, vibração, aceleração e humidade [1], [4], [6], [12], [20], [27] e [33]. Uma das primeiras grandezas a ser medida utilizando dispositivos SAW foi a temperatura, utilizando linhas de atraso em substrato de niobato de lítio, caracterizado por ter um coeficiente de atraso com a temperatura de 94ppm/°C [2], página 31, estes dispositivos podem ser vantajosamente montados nos sistemas de travão dos veículos pesados evitando os incêndios, acidentes perigosos ou fadiga prematura dos vedantes, que advêm da sobrecarga térmica dos discos ou maxilas de travagem. Para medição da temperatura com base em dispositivos SAW, a utilização de substratos de liga de óxido de germânio e bismuto ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) é mais adequada por este material apresentar um coeficiente de atraso com a temperatura de 120ppm/°C, porém tem o inconveniente de ser um material dispendioso. Por isso o substrato utilizado com mais frequência para este fim é o niobato de lítio, LiNbO_3 . Força, binário, pressão, deslocamento, vibração e aceleração, são grandezas que podem ser medidas a partir do efeito directo na variação da velocidade de propagação das ondas superficiais num dispositivo SAW, quando sujeito às tensões de contracção ou expansão do seu substrato [6], [27] e [28].

Humidade, campo magnético e outras grandezas podem também ser medidas indirectamente utilizando dispositivos SAW, nos quais é ligada uma impedância de carga variável a um dos portos, figura 38. Neste caso, em vez da medição ser feita com base na

variação da velocidade de propagação resultante da deformação do substrato, o SAW é visto como uma linha de transmissão com atraso, na qual a amplitude e/ou a fase do sinal reflectido são função da desadaptação provocada pela variação da impedância de carga ligada no fim da linha. No fundo fazemos variar a reflectividade de um dos transdutores interdigitais [12]. Por exemplo se utilizarmos como carga de uma linha de atraso, um bloco de gesso com dois eléctrodos pode construir-se um sensor de humidade, um condensador no qual o dieléctrico é um gás que está isolado do exterior a uma pressão de referência poderá ser um sensor de pressão e um solenóide no qual se desloque um núcleo de ferrite poderá ser um sensor de deslocamento com uma gama considerável. Utilizando este princípio abrem-se as portas para a medição de uma grande variedade de grandezas como o campo eléctrico, correntes eléctricas, radiação, análise e detecção de substâncias químicas em vapores e etc.

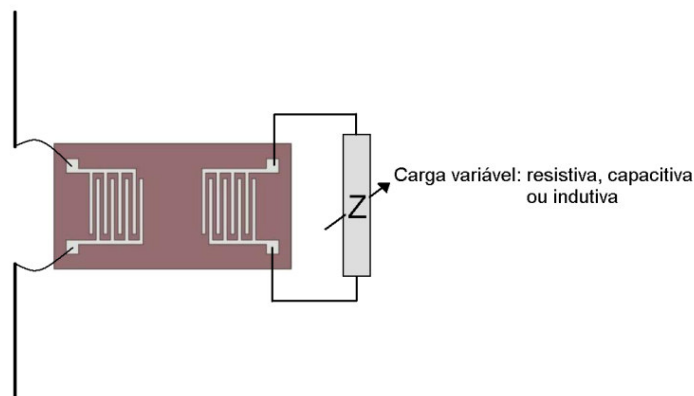


Figura 38 – Estrutura de um sensor SAW no qual a medição de uma grandeza física é feita variando a impedância de carga de um dos portos.

Uma aplicação interessante dos dispositivos SAW como sensores de pressão é o chamado pneu inteligente apresentado em [27], este vem equipado com um sensor de pressão baseado em SAW que é interrogado sem contacto físico por uma unidade de leitura montada na zona do guarda lamas da viatura que comunica com o resto do sistema de controlo e monitorização da viatura por barramento CAN por exemplo. Este sistema permite uma resolução de 0,05Bar. Esta aplicação engenhosa permite que sejam evitados acidentes e que o processo de desgaste do pneu seja rentabilizado, figura 39.

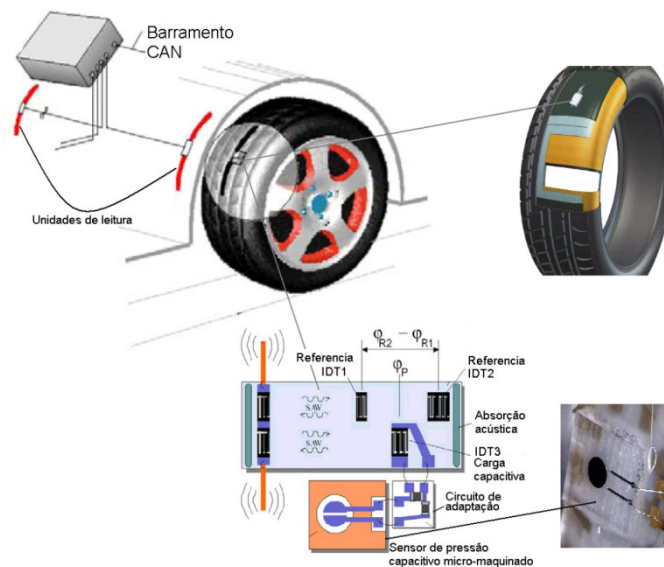


Figura 39 – Sistema de medição da pressão em pneus de automóveis, baseado em SAW.

Na aplicação do pneu inteligente ilustrada na figura 39, utiliza-se uma combinação de quatro transdutores interdigitais, um está ligado à antena responsável pela recepção e retransmissão dos sinais reflectidos no substrato, dois (IDT1 e IDT2) servem como referência permitindo que sejam eliminadas perturbações relacionadas com as vibrações e variações de temperatura que o pneu sofre em movimento. O terceiro transdutor interdigital, IDT3, tem ligado aos seus terminais, um sensor capacitivo micromaquinado, que funciona como carga de impedância variável e que vai afectar a reflectividade deste transdutor interdigital.

Na tabela que se segue são apresentadas as resoluções obtidas para a medição de várias grandezas publicadas em [12].

Tabela 2 – Resoluções típicas para sensores baseados em SAW, interrogados remotamente, [12].

Grandeza a medir	Fenómeno físico	Resolução
<i>Identificação</i>	Análise do sinal reflectido	32Bit
<i>Temperatura</i>	Variação da velocidade de propagação no SAW	0.1°C
<i>Deformação mecânica (pressão, binário e aceleração)</i>	Variação das constantes elásticas do substrato	1% da totalidade da escala
<i>Utilizando sensores como impedância de carga variável</i>	Variação da amplitude e fase do sinal reflectido	5% da totalidade da escala
<i>Distância</i>	Atraso do sinal	20cm
<i>Posição relativa</i>	Medida contínua da fase de Döppler	2cm
<i>Posição angular</i>	Medida da fase de Döppler	3°

Outra aplicação interessante dos SAW é nos sistemas de análise de odores e detecção de substâncias químicas, vulgarmente conhecidos por *nariz electrónico*. Nestes dispositivos, uma série de dispositivos SAW com diferentes camadas de polímeros, cada uma permeável a uma determinada substância, é exposta ao vapor ou mistura de gases a analisar, com o fim de detectar a existência e concentração de uma determinada substância gasosa, [26], [31] e [32]. As primeiras versões destes dispositivos sofre de alguma falta de sensibilidade e sendo lentos a produzir resultados. Recentemente estes dispositivos têm sido aperfeiçoados tendo em vista a sua aplicação em equipamento militar e segurança pública. Nas últimas versões, os dispositivos SAW passaram a estar ligados a elementos de Peltier, o que possibilita que a sensibilidade do dispositivo possa ser aumentada ou então mantida constante de acordo com necessidades específicas. Também os tempos de análise foram fortemente encurtados passando de minutos para cerca de 10 segundos, o que viabiliza que estes dispositivos sejam utilizados nas metrópoles modernas (em estações de metropolitano e locais públicos) como forma de monitorização e alarme, de eventuais ataques terroristas, concentração excessiva de gases tóxicos provenientes de indústrias ou

transportes e acidentes graves. Estão em fase de teste para aplicações militares dispositivos híbridos capazes de detectar em simultâneo agentes químicos, biológicos e nucleares. Estes dispositivos são capazes de detectar baixíssimas concentrações de agentes nervosos como os gases sarin e mostarda, explosivos derivados do azoto como o TNT e RDX.

Recentemente foi proposto em [29], a utilização de um nariz electrónico baseado em SAW, capaz de detectar e diagnosticar de forma não invasiva o cancro do pulmão. O *nariz* está ligado a um sistema que faz a separação dos vários compostos orgânicos voláteis expirados juntamente com o ar dos pulmões do paciente. Tendo sido previamente validados como evidências da presença de cancro do pulmão doze compostos orgânicos expirados pelo paciente, estes poderão ser detectados qualitativamente e quantitativamente por um nariz electrónico baseado em SAW.

Existe actualmente um interesse crescente por parte de algumas agências de exploração espacial e empresas da aeronáutica pelos sensores baseados em dispositivos SAW. Como é sabido, por questões de segurança e economia o espaço extraterrestre tem sido explorado preferencialmente fazendo uso de sondas não tripuladas. Estes sistemas estão repletos de instrumentação de medida e equipamento de monitorização do funcionamento da própria sonda. Neste equipamento existem um conjunto de pré-requisitos de engenharia que os dispositivos SAW podem preencher de forma bastante conveniente e económica. Este tipo de sistemas pode estar exposto a condições muito adversas e por vezes imprevisíveis, sendo fundamental que o equipamento de monitorização e a instrumentação de bordo cumpra as seguintes especificações:

- Seja uma tecnologia robusta, fiável e bem conhecida
- Permita a medição de várias grandezas físicas
- Consuma o mínimo de energia possível
- Esteja isenta de operações de manutenção
- Seja pouco susceptível a condições adversas, como grandes variações de temperatura, campos magnéticos ou radiação
- Seja leve e ocupe pouco espaço

3.2.2 Utilização de SAW's como actuadores

Com a crescente automatização de processos, aumenta a procura de actuadores de precisão, compactos e robustos. Os actuadores baseados em SAW são exactos e não requerem o uso de lubrificantes, o que os torna convenientes para aplicações em vácuo ou em salas limpas. Como o meio de tracção de baseia nas ondas de superfície, este tipo de dispositivos pode também ser utilizado em aplicações onde os campos magnéticos produzidos

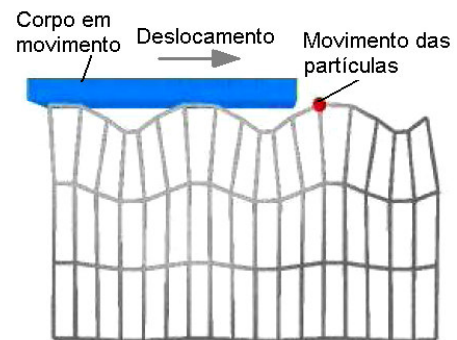


Figura 40 – Princípio de funcionamento dos actuadores baseados em SAW.

pelos actuadores eléctricos tradicionais possa causar problemas. A propagação de uma onda de superfície está associado um movimento circular ou elíptico das partículas que compõem a superfície do substrato. A componente tangencial da velocidade de rotação dessas partículas vai ser a velocidade de deslocamento da parte móvel do actuador, ver figuras 40 e 41. Estes actuadores são compostos por uma tira de substrato onde se irão propagar as ondas de superfície. Em cada extremo do substrato estão localizados dois transdutores interdigitais para possibilitar o avanço e recuo do actuador. O contacto entre a parte móvel do actuador e a superfície onde se propagam as ondas superficiais está dotada em muitos caso, de atrito suficiente para que a parte móvel se mantenha estática mesmo que o actuador não esteja a ser alimentado, o que é bastante vantajoso em aplicações de posicionamento de objectos.

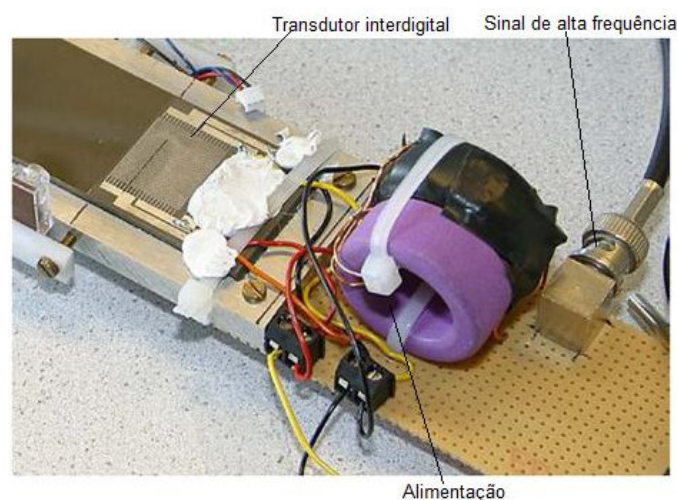


Figura 41 – Pormenor da alimentação e transdutores interdigitais de um actuador baseado em SAW.

3.2.3 Utilização de SAW's como etiquetas (RFID's)

Nas etiquetas de identificação baseadas em SAW têm surgido desenvolvimentos interessantes. Em [5], é descrito um sistema de identificação baseado em SAW, bastante robusto, com capacidade para guardar de um valor com 64Bit o que obviamente permite a identificação de 2^{64} objectos distintos, este sistema opera na banda ISM de 2,44GHz a 2,5GHz. Para além dos 64Bit de informação, que conferem grande capacidade de dados, estas etiquetas vêm equipadas com 16Bit extra para implementação de um código de correcção de erros, o que permite um aumento significativo da distância máxima de leitura e imunidade do sistema a eventuais perturbações provenientes do ruído ambiente.

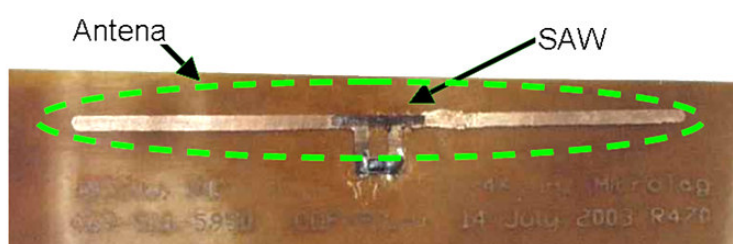


Figura 42 – Etiqueta de identificação baseada em SAW, com antena incluída, para a banda ISM de 2,44GHz. São evidentes as reduzidas dimensões do dispositivo.

Em [16] são publicadas várias melhorias ao sistema apresentado em [5] pelo mesmo grupo. Neste trabalho são propostas etiquetas de identificação com capacidades acima de 256Bit e a adição de mecanismos anti colisão.

O desenho dos reflectores foi aperfeiçoado com vista a diminuir efeitos relacionados com a distorção na fase e amplitude dos sinais. Um dos aperfeiçoamentos foi o desenho de reflectores com largura crescente consoante a distância a que se encontram do transdutor interdigital de excitação, o que permite que a amplitude dos vários ecos seja aproximadamente igual para todos à saída da etiqueta de identificação. Foram também tidos cuidados no distanciamento entre reflectores e adicionada informação redundante sobre a fase e amplitude da resposta da etiqueta. Foi também adicionado um número de série fixo para cada etiqueta, independente do número de identificação da etiqueta. Isto permite por exemplo, que sejam questionadas várias etiquetas em simultâneo, sendo a unidade de leitura responsável por distinguir as várias etiquetas, analisando a amplitude e fase dos ecos recebidos. Para minimizar a interferência entre dispositivos foram tidos cuidados com o desenho das antenas nas unidades de leitura potenciando a directividade e

ganho das antenas na direcção dos dispositivos a questionar, o que permite que a energia transmitida e a capacidade de recepção dos sinais sejam concentrados na zona pretendida.

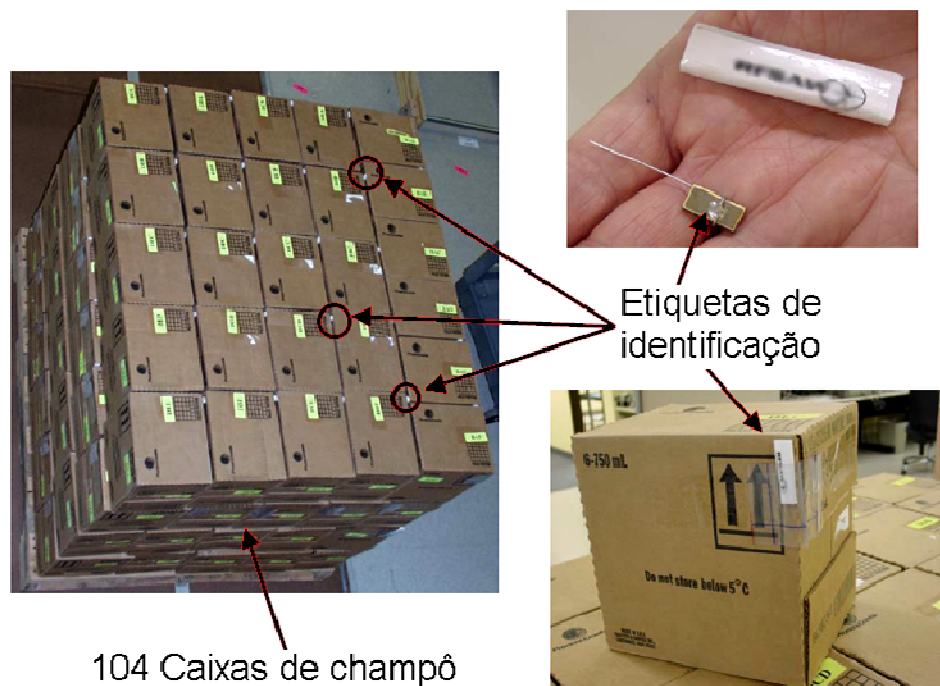
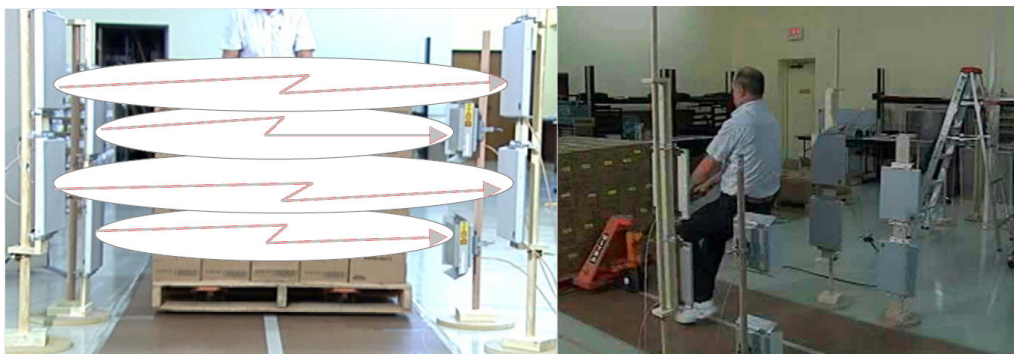


Figura 43 – Identificação de cento e quatro caixas de champô, utilizando etiquetas de identificação SAW apresentadas em [16].



4

Representações e modelos matemáticos dos transdutores interdigitais



Neste capítulo são apresentados alguns modelos capazes de descrever matematicamente os fenômenos físicos relacionados com o funcionamento dos transdutores interdigitais. Estes podem ser ferramentas úteis para o desenho de dispositivos SAW.

4.1 Introdução

Neste capítulo analisam-se os três principais modelos matemáticos que tentam aproximar o funcionamento dos transdutores interdigitais. Estes modelos foram construídos no começo do desenvolvimento e concepção de filtros para sinal, propositadamente para este fim. Serão abordados os modelos função delta, campo cruzado e resposta impulsional.

O modelo função delta permite demonstrar que um transdutor interdigital pode ser modelado como uma estrutura de dados amostrados. Embora este modelo não forneça qualquer informação sobre a impedância ou níveis de perdas, pode ser utilizado como ferramenta para obtenção rápida de um transdutor interdigital ou frequência de resposta de um filtro. As principais limitações deste modelo são o facto de não fornecer informação sobre as impedâncias de entrada e saída do transdutor interdigital e sobre as perdas por inserção.

O modelo de campo cruzado fornece informação sobre a resposta em frequência, e sobre as impedâncias de entrada e saída de um transdutor interdigital. Este modelo pode também ser utilizado para obtenção dos parâmetros de condutância de um transdutor interdigital excitado, na transmissão ou recepção de ondas superficiais. A versão apresentada deste modelo não incorporara os efeitos das reflexões acústicas parasitas que podem ocorrer nas franjas de um transdutor interdigital e que distorcem a resposta em frequência de um transdutor interdigital.

O modelo de resposta impulsional de um transdutor interdigital será apresentando de forma simplificada. Este permite o escalonamento de frequências num transdutor interdigital e deve ser empregue no estudo desenvolvimento de transdutores interdigitais não uniformes, em filtros de banda larga ou de compressão/expansão de impulso.

Uma descrição detalhada destes e outros modelos mais elaborados, para aplicação no desenho de filtros e outros dispositivos de processamento de sinal baseados em SAW pode ser encontrada em [2].

4.2 O modelo função delta

O modelo função delta é o mais simples de todos os modelos que tentam descrever o funcionamento de um transdutor interdigital uniforme. Este modelo pode ser aplicado a transdutores interdigitais com espaçamento constante entre as franjas, tendo estas comprimento uniforme ou variável, por exemplo no desenho de filtros de expansão de impulso. A maior limitação deste modelo é não poder ser aplicado para obter os valores absolutos das perdas por inserção, porque não tem nenhuma forma de assegurar os níveis de impedância dos transdutores. Apesar disso este modelo pode ser bastante útil para a simulação da resposta em frequência de um dispositivo em esboços de filtros.

O modelo função delta é na realidade a representação de um filtro ideal transversal. No domínio do tempo a saída $y(t)$ deste filtro, é a sobreposição das saídas de uma série de atrasos a que é sujeito um impulso de entrada $x(t)$, ver a figura 45. Para N atrasos a saída é dada por:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n x(t - T_n) \quad (4.1)$$

Em termos dos parâmetros do transdutor interdigital de um dispositivo SAW, A_n corresponde ao comprimento das franjas que neste caso pode ser variável, n corresponde ao enésimo par de franjas, T_n corresponde ao atraso incremental para a onda de superfície que se desloca em direcção ao enésimo par de franjas. Para um número finito N de pares de franjas, este filtro tem resposta finita a um impulso, logo poderá ser visto como um sistema estável.

Se for feita uma transformação no domínio do tempo para o domínio da frequência [42], o que corresponde a multiplicar pela transformada de Fourier passamos a ter a resposta em frequência à saída $Y(\omega)$ dada por:

$$Y(\omega) = \sum_{n=1}^N A_n \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - T_n) e^{-j\omega t} dt = \sum_{n=1}^N A_n e^{-j\omega T_n} X(\omega), \quad (4.2) \rightarrow$$

$$Y(\omega) = H(\omega) X(\omega), \quad (4.3)$$

onde $Y(\omega)$ é a transformada de Fourier de $y(t)$ e $X(\omega)$ é a transformada de Fourier de $x(t)$. A partir da equação anterior a frequência de resposta $H(\omega)$ do filtro transversal é dada por:

$$H(\omega) = \sum_{n=1}^N A_n e^{-j\omega T_n} \quad (4.4)$$

Onde , para franjas com espaçamento uniforme e .

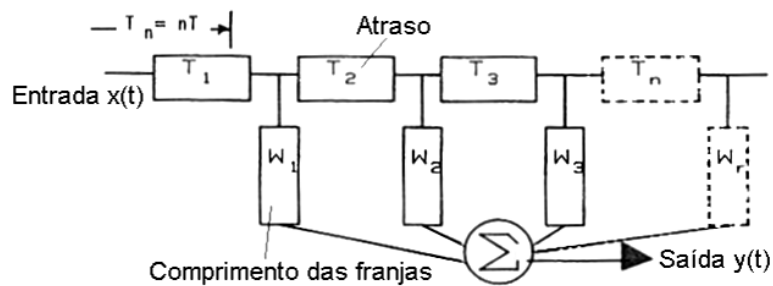


Figura 45 – Representação do circuito equivalente de um filtro transversal

4.3 Modelo de campo cruzado

O modelo de campo cruzado deriva do circuito equivalente de Mason, empregue na modelação de geradores de ondas acústicas em transdutores piezoelétricos, [2]. Neste modelo, a distribuição do campo eléctrico entre os eléctrodos de um transdutor interdigital é aproximada, como sendo perpendicular à superfície do substrato piezoelétrico, como se estivesse entre as placas de um condensador, ver a figura 47. Neste modelo, cada transdutor interdigital é representado como um sistema de três portas, figura 46. Os portos 1 e 2 representam os equivalentes eléctricos dos portos acústicos de um transdutor interdigital, ou seja os portos de onde partem ou chegam as ondas de superfície, enquanto o porto 3 é um verdadeiro porto eléctrico e representa a ligação às linhas de alimentação que excitam o transdutor interdigital.

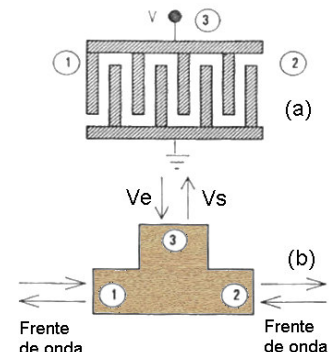


Figura 46 – (a) Transdutor interdigital visto como um sistema de três portas, representação dos portos no modelo de campo cruzado.

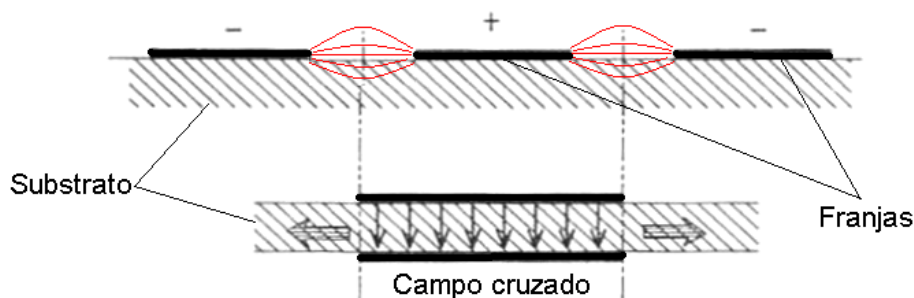


Figura 47 – Modelo de campo cruzado, aproximação do campo eléctrico gerado pelas franjas ao campo existente entre as placas de um condensador.

Uma nota importante é que também este modelo não tem em conta as reflexões parasitas geradas em situações nas quais a espessura da camada de metal que compõe as franjas do transdutor interdigital é superior a aproximadamente uma centésima parte do comprimento das ondas de superfície que se irão propagar no dispositivo SAW em desenvolvimento, neste modelo parte-se do princípio que o raio de metalização $h/\lambda < 1\%$.

Para que os três portos possam ser tratados como portos eléctricos, os portos 1 e 2 (figura 46) que transmitem e recebem ondas de superfície, tem de ser convertidos nos seus equivalentes eléctricos. Nestes portos as tensões relacionadas com as ondas de superfície expressas em Newton, são transformadas nas tensões eléctricas equivalentes e as velocidades de propagação das ondas de superfície, são transformadas nas correntes equivalentes. Se for considerada uma constante de proporcionalidade comum designada por c , as transformações poderão ser descritas da seguinte forma:

$$V = \frac{F}{c} \quad (4.5)$$

$$I = Vc \quad (4.6)$$

Onde c é interpretado como sendo o raio de espiras de um transformador electro-acústico hipotético equivalente. Esta transformação permite que a impedância mecânica característica do substrato piezoeléctrico $Z_m = F/v$, seja expressa como a impedância característica da linha de transmissão equivalente Z_0 . Para uma frente de onda superficial

que se propague num substrato com densidade ρ (Kg / m^3) e tenha uma frente com área A (m^2), a impedância mecânica pode ser escrita como:

$$Z_m = \rho v A \quad (4.7)$$

Enquanto a impedância eléctrica característica é:

$$Z_0 = \frac{Z_m}{c^2} \quad (4.8)$$

As definições anteriores permitem que a admitância característica da linha de transmissão $G_0 = 1/Z_0$, seja escrita:

$$G_0 = K^2 C_s f_0 \quad (4.9)$$

Onde K^2 é o coeficiente de acoplamento electromecânico do substrato piezoeléctrico, f_0 é a frequência central de excitação do transdutor interdigital e C_s é a capacidade estática de uma secção periódica do transdutor interdigital ou seja entre um par de franjas. A capacidade estática C_s pode também ser expressa como $C_s = C_o W$, onde C_o é a capacidade por par de franjas por comprimento e W é o comprimento das franjas.

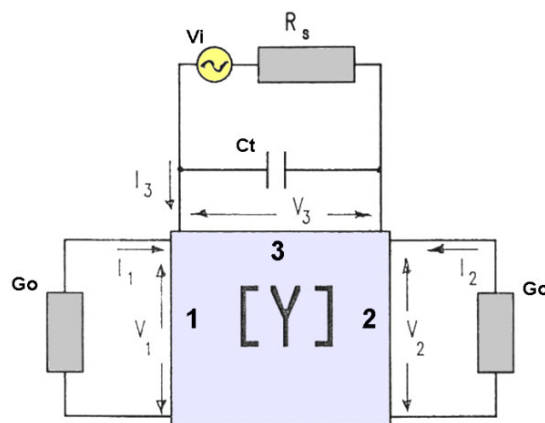


Figura 48 – Representação de um transdutor interdigital como um sistema de três portas aos quais são associadas admitâncias, utilizando o modelo de campo cruzado. G_0 é a condutância característica equivalente de uma linha de transmissão SAW.

Depois de obtida a admitância de entrada em função da estrutura e frequência de funcionamento do transdutor interdigital, pode-se obter as relações equivalentes das tensões e correntes (figura 48) para um transdutor interdigital. Estas relações são dadas pela matriz $[Y]$, em função dos três portos vistos como admitâncias:

$$\begin{pmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{pmatrix} = [Y] \begin{pmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

A matriz 3×3 de admitâncias $[Y]$, tem a forma

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

utilizando a notação apresentada os elementos Y_{11}, Y_{12}, Y_{21} e Y_{22} da matriz $[Y]$, estão relacionados com a linha de transmissão equivalente ao dispositivo SAW. Assim, aplicando a reciprocidade e simetria das linhas de transmissão, pode-se simplificar a matriz $[Y]$ ficando, $Y_{11} = Y_{22}$ e $Y_{21} = Y_{12}$. Pode também ser aplicada uma simplificação aos restantes elementos da matriz que envolvem o porto eléctrico 3 pondo $Y_{32} = -Y_{13}$, o sinal negativo é aqui requerido porque se for aplicada uma tensão ao porto 3 serão geradas duas frentes de onda nos portos 1 e 2 que se propagarão em sentidos opostos. Então a matriz $[Y]$ pode ser reduzida a:

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{12} & Y_{11} & -Y_{13} \\ Y_{31} & -Y_{13} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Outra expressão importante para o desenho de transdutores interdigitais, utilizando o modelo de campo cruzado, é a expressão da condutância de entrada à radiação num transdutor interdigital, a trabalhar à frequência central de funcionamento:

$$G_a(f_0) = 8K^2 f_0 C_s N^2 \quad (4.13)$$

como,

$$G_0 = K^2 C_s f_0 \quad (4.14)$$

Pode-se então escrever:

$$G_a(f_0) = 8N^2 G_0 \quad (4.15)$$

O circuito equivalente para a impedância de entrada de um transdutor interdigital é apresentado na figura que se segue.

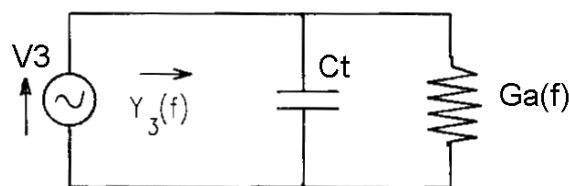


Figura 49 – Admitância de entrada de um transdutor interdigital (porto eléctrico três), segundo o modelo de campo cruzado. Ct é o valor da capacidade total do transdutor interdigital.

Resta salientar que modelo de campo cruzado é utilizado na obtenção estrutura dos transdutores interdigitais do dispositivo SAW experimental descrito no próximo capítulo deste texto.

4.4 Resposta impulsional

A modelação do transdutor interdigital baseada no modelo de resposta impulsional, fornece informação adicional sobre a resposta em frequência de um transdutor interdigital, em relação ao modelo função delta. Nele podem também ser incluídas as impedâncias do circuito e malhas de adaptação. Este modelo fornece também informação sobre o escalonamento da frequência a ser utilizado para que sejam determinadas os comprimentos e larguras das franjas, em filtros de banda larga, expansão de impulso e etc.

No fundo, o modelo da resposta impulsional utiliza relações pares da transformada de Fourier para determinar a resposta impulsional $h(t)$, de um filtro baseado num dispositivo SAW, obtendo-se assim a resposta em frequência desejada $H(f)$.

Assim este modelo está adequado para a obtenção de transdutores interdigitais que produzam uma resposta em frequência pretendida, sendo mais adequado no desenho de filtros, saindo fora do contexto e aplicação principal deste texto. Uma descrição detalhada deste modelo pode ser encontrada em [2].

5

Projecto de um dispositivo SAW experimental com capacidade para identificação e medida



Partindo dos conhecimentos e metodologias apresentados nos capítulos anteriores deste texto, são apresentadas e justificadas várias opções tidas em conta, no desenho final de dois dispositivos SAW experimentais, com capacidade de identificação remota configurável e medida de grandezas físicas.

5.1 Introdução

Ao fim de passados em revista a história, aplicações e os principais conhecimentos que suportam a aplicação dos dispositivos SAW como sensores, é chegada a hora de apresentar o projecto de um dispositivo SAW experimental com capacidade de identificação e medição de grandezas físicas.

Começa-se por apresentar as especificações desejadas para o dispositivo, número de bits do código de identificação, frequência central de funcionamento, largura de banda do dispositivo e requisitos relacionados com a estabilidade térmica. Em consequência dessas especificações é escolhido o substrato e calculadas a largura e separação entre franjas, finalmente é apresentado um esboço de um dispositivo SAW experimental, uma estrutura capaz de cumprir as especificações, substrato, transdutor interdigital, reflectores e tempos de propagação desejados.

Já com o substrato escolhido e alguns parâmetros predefinidos como a frequência de funcionamento e tempos de atraso, é feito um conjunto de simulações em computador, utilizando o modelo de campo cruzado. Destas simulações resulta um conjunto de gráficos, nos quais são relacionados os vários parâmetros estruturais de um transdutor interdigital com a sua impedância de entrada. Estes gráficos fornecem informação, que permite escolher as dimensões finais do transdutor interdigital principal, de modo que a estrutura seja reprodutível e haja uma boa adaptação de impedância entre a antena e o transdutor interdigital.

Passa-se em seguida à apresentação da estrutura dos reflectores, escolha do metal em que serão feitas as estruturas e respectiva espessura, dimensões dos *pads* ou pontos onde será feita a ligação dos reflectores e transdutores interdigitais.

No final são apresentadas duas variantes do dispositivo SAW experimental, um com nove reflectores e outro com cinco.

5.2 Especificações iniciais

5.2.1 Frequência central de funcionamento e largura de banda

Engenharia é a arte da aplicação prática do conhecimento científico, apelidado pelos pedagogos de “saber saber” e a concepção de soluções de compromisso em tempo útil. Neste trabalho, existem várias condicionantes à escolha da frequência de funcionamento de um dispositivo SAW desta natureza. Por um lado é conveniente que a frequência seja suficientemente elevada de modo a permitir que os dispositivos sejam ligados a antenas por exemplo do tipo dipolo de meia onda de pequenas dimensões (entende-se como pequenas dimensões cerca de 10 centímetros), [37] e [39]. Por outro lado, a utilização de frequências elevadas, da ordem do GHz, torna a realização da electrónica responsável por questionar os dispositivos mais complexa e obriga o acesso a tecnologia de fabrico dos dispositivos SAW (salas limpas e litografia de alta resolução) mais complexa e dispendiosa. Frequências desta ordem de grandeza obrigam também à utilização de substratos com maior pureza e melhor acabamento ou polimento das superfícies onde se irão propagar as ondas de superfície, visto que com o aumento da frequência a atenuação sofrida pela frente de onda ao propagar-se, e as reflexões parasitas intensificam-se. Depois e embora esteja a ser abordado um dispositivo experimental, o trabalho não se deve distanciar excessivamente das possíveis aplicações, existindo requisitos relacionados com a legislação em vigor para a distribuição do espectro radioelétrico, que não deverão ser esquecidos.

Assim, tendo em conta a problemática atrás referida optou-se por desenhar um dispositivo SAW para uma frequência central de funcionamento de 433,92MHz. Esta frequência situa-se exactamente no centro da banda ISM para aplicações industriais, científicas e médicas dos 433,05MHz a 434,79MHz, segundo o quadro de atribuição de frequências Português [23], o que significa uma largura de banda legal de 1,74MHz. Outra situação vantajosa se utilizada esta frequência é a existência de inúmeros osciladores e filtros sintonizados para esta frequência, disponíveis no mercado que facilitarão em muito a realização prática da electrónica de suporte. A esta frequência o dispositivo de onda superficial experimental poderá ser ligado a um dipolo de meia onda feito com um condutor

fino com um comprimento total de cerca de trinta e cinco centímetros, o que é uma dimensão aceitável para testes laboratoriais e de campo.

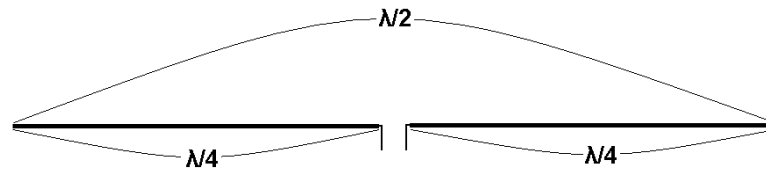


Figura 50 – Estrutura de um dipolo de meia onda [37], [39].

5.2.2 Capacidade do código de identificação

Os requisitos de código de identificação do dispositivo SAW experimental descrito neste capítulo são 8 bit. No entanto será também apresentado no fim deste capítulo, um dispositivo com quatro bit de código de identificação. Nesse caso pretende-se obter um maior período de tempo de separação entre ecos o que poderá facilitar o posterior estudo, domínio e aperfeiçoamento da tecnologia.

5.3 Selecção do substrato

A escolha do substrato é uma questão primordial no desenho de dispositivos SAW. Existem várias condicionantes à escolha de um substrato que vão desde as performances pretendidas até à sua disponibilidade e preço nos circuitos comerciais. A velocidade de propagação das ondas superficiais num determinado substrato vai influenciar o atraso dos ecos, o desenho dos transdutores interdigitais e como consequência o tamanho final dos dispositivos SAW.

Outro parâmetro fulcral é o coeficiente de acoplamento electromecânico K^2 abordado no capítulo dois deste texto, este representa a eficiência com que um determinado substrato com características piezoeléctricas converte energia eléctrica em energia mecânica e vice-versa. Logo é importante o uso de materiais piezoeléctricos para substrato com valor de K^2 elevado, de modo a que a amplitude dos ecos provenientes de um dispositivo SAW seja elevada, o que de imediato possibilita o aumento da distância de leitura de um dispositivo SAW passivo.

A escolha do substrato para aplicação de dispositivos SAW como sensores é também fortemente influenciada pelo coeficiente de temperatura do atraso característico de cada substrato. Caso não sejam tomadas as devidas precauções na escolha do substrato do sensor, o produto final poderá ser um dispositivo com baixa estabilidade térmica e reduzida exactidão. Este coeficiente, abordado no capítulo dois deste texto, pode ser fortemente influenciado pela escolha correcta do ângulo de corte do substrato. Uma opção frequentemente utilizada em dispositivos SAW para funcionar como sensores é o corte ST do quartzo. Esta orientação do corte tem como grande vantagem o facto de apresentar coeficiente de temperatura do atraso nulo.

O material utilizado como substrato para o dispositivo SAW experimental descrito neste capítulo é o quartzo (SiO_2) corte ST, e eixo de propagação X. Este material tem as seguintes propriedades relevantes para o desenho de dispositivos SAW:

- Velocidade de propagação das ondas de superfície de 3158 m/s
- Coeficiente de acoplamento electromecânico \mathcal{K}^2 com valor $\approx 0,1\%$
- Atenuação à frequência de 433MHz com valor 0,75db/ μs
- Coeficiente de temperatura do atraso 0 ppm/ $^\circ\text{C}$

Embora este material tenha a desvantagem de ter um valor do coeficiente de acoplamento electromecânico relativamente baixo, a sua abundância e disponibilidade no mercado (amplamente utilizado em osciladores actuadores e sensores) e a ausência de coeficiente de atraso com a temperatura foram argumentos de peso para a sua escolha.

É de realçar ainda que para a aplicação descrita deverá ser utilizado o quartzo descrito atrás em bolachas ou lâminas, com um nível de polimento da superfície elevado. A superfície deverá ter uma rugosidade inferior a 100nm, cerca de um centésimo do comprimento das ondas que se irão propagar na superfície, [2]. Os cuidados com a rugosidade evitam inconvenientes relacionados com atenuação da frente de onda e reflexões parasitas. A espessura das bolachas ou lâminas não é uma questão crítica, uma vez que a profundidade de penetração das ondas de superfície é cerca de um comprimento de onda, mas por razões de resistência mecânica e capacidade de manuseamento do

dispositivo (principalmente no processo de fabrico), a espessura do substrato deverá ser igual ou superior a 250 μ m.

A partir da informação apresentada atrás sobre o quartzo corte ST (eixo de propagação X), é fácil determinar o comprimento das ondas de superfície neste substrato a 433,92MHz, um valor essencial para o desenho dos transdutores interdigitais e reflectores. Segue-se o cálculo:

$$v = \frac{\lambda}{t} = \lambda f \Leftrightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3158m/s}{433,92MHz} = 7,28\mu m \quad (5.1)$$

5.3.1 Largura e separação entre franjas dos transdutores interdigitais e reflectores

Neste momento já é conhecida a frequência central de funcionamento do transdutor interdigital de excitação do dispositivo SAW experimental, a velocidade de propagação das ondas superfície característica do substrato e consequentemente o comprimento de onda das mesmas. É oportuno calcular com base em [13] e [38], a largura das franjas e o espaçamento entre franjas consecutivas, este cálculo é feito partindo-se do principio que são utilizados transdutores interdigitais uniformes. Na figura 51 ao lado, é apresentado um troço da estrutura de um transdutor interdigital. As franjas deverão ter largura $\lambda/4$ e franjas consecutivas deverão estar separadas de $\lambda/4$, sendo λ o comprimento das ondas de superfície que serão geradas ou recebidas pelo transdutor. O comprimento de onda, λ , das ondas de superfície no quartzo é 7,28 μ m, logo a largura e espaçamento entre as franjas é:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{7,28\mu m}{4} = 1,82\mu m \quad (5.2)$$

Este valor exige a utilização de meios de litografia de resolução razoavelmente elevada.

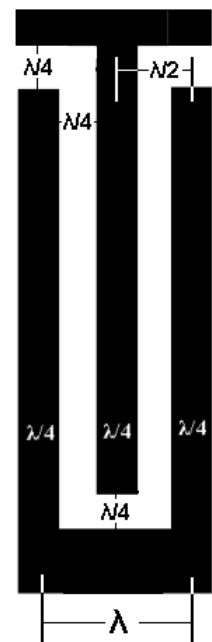


Figura 51 –
Dimensões e
espaçamento entre
franjas num
transdutor
interdigital
uniforme.

5.4 Esboços de estruturas capazes de implementar os requisitos para o dispositivo SAW experimental

Na figura que se segue são apresentados, os esboços elaborados com a disposição do transdutor interdigital de excitação e reflectores.

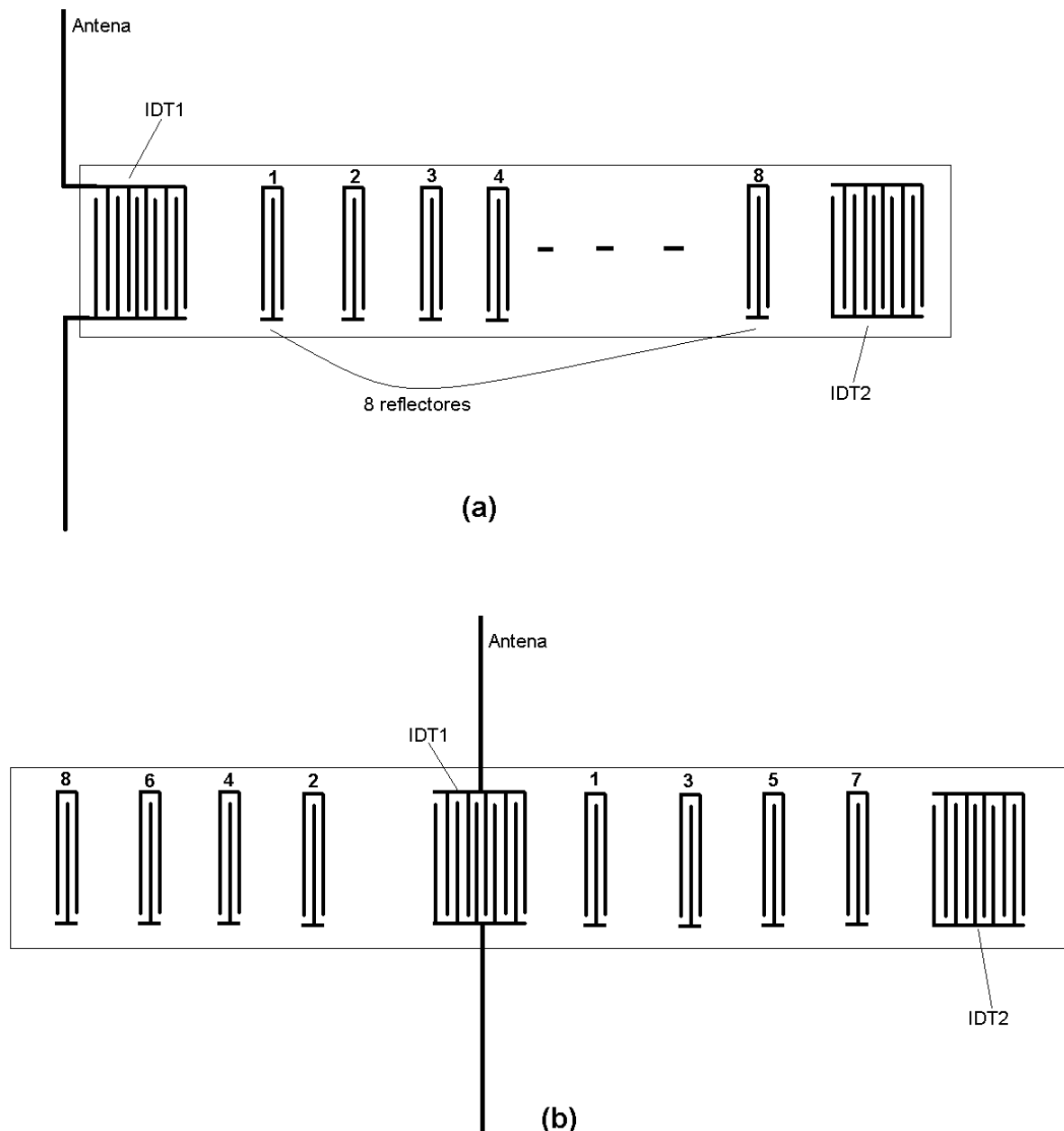


Figura 52 – Estruturas possíveis para o dispositivo SAW experimental, em (a) um transdutor interdigital IDT1 ligado a uma antena, com oito reflectores para identificação e um reflector final de um dos lados. Em (b) os reflectores estão dispostos de forma alternada, para aproveitar as duas frentes de onda geradas pelo transdutor interdigital de excitação.

De um modo geral em ambos os esboços apresentados na figura anterior, existe um transdutor interdigital uniforme responsável por transformar os impulsos radioelétricos recebidos pela antena em ondas de superfície que se irão propagar pelo substrato. Estão também presentes nove reflectores, oito estarão ligados ao mundo exterior permitindo que o código de identificação seja configurável, por exemplo utilizando pequenos comutadores e cargas que permitirão ou não a adaptação dos reflectores à impedância acústica das ondas de superfície.

No esquema (a) da figura 52 é proposta uma estrutura que se baseia num transdutor interdigital, oito reflectores devidamente espaçados de modo a ser obtida a separação temporal desejada entre os ecos que irão gerar o código de identificação do dispositivo e um reflector final de maiores dimensões, responsável pela reflexão total da frente de onda restante. Este último reflector permitirá que seja medida uma grandeza física, mesmo no caso do código de identificação do dispositivo ser ob00000000. Porém dispositivo representado na figura 52 (a) apresenta alguns inconvenientes. Como já foi abordado, o transdutor interdigital uniforme gera duas frentes de onda, ou seja quando o transdutor interdigital de excitação identificado na figura 52 (a) como IDT1, é alimentado por um impulso de potência P e assumindo $\mathcal{K}^2=100\%$, este irá gerar duas frentes de onda cada uma com potência $P/2$, uma propagar-se-á na direcção dos reflectores outra será perdida, portanto metade da energia transformada em ondas superficiais é desperdiçada, podendo inclusive causar problemas de reflexões parasitas se não forem tomados os devidos cuidados. Pode ser utilizado um transdutor interdigital unidireccional o que exige a utilização de litografia com o dobro da resolução necessária para a produção de um transdutor interdigital uniforme, uma vez que este transdutor emprega franjas com largura $1/8$ do comprimento das ondas de superfície a gerar. Este problema pode também ser minimizado se for colocado estrategicamente (a uma distancia múltipla de um comprimento de onda) do lado esquerdo do IDT1, um reflector, na tentativa de gerar uma interferência construtiva com a frente de onda que se desloca para a direita, figura 53. Tal solução exige exactidão acrescida ao processo de fabrico, sendo desadequada para a finalidade inicial deste projecto. Depois existe outra agravante: a frente de onda gerada,

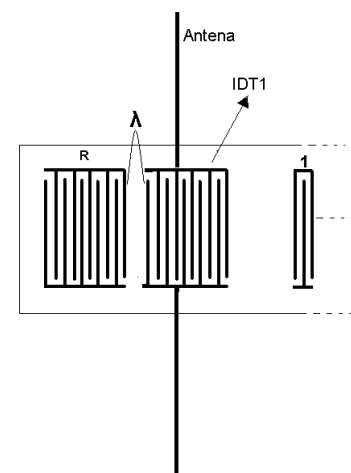


Figura 53 – Alteração ao dispositivo apresentado na figura 52 (a).

Este problema pode também ser minimizado se for colocado estrategicamente (a uma distancia múltipla de um comprimento de onda) do lado esquerdo do IDT1, um reflector, na tentativa de gerar uma interferência construtiva com a frente de onda que se desloca para a direita, figura 53. Tal solução exige exactidão acrescida ao processo de fabrico, sendo desadequada para a finalidade inicial deste projecto. Depois existe outra agravante: a frente de onda gerada,

terá de ultrapassar oito reflectores sofrendo atenuações sucessivas até chegar ao reflector final.

No esquema (b) da figura 52, é apresentada uma variante, na qual continuam a existir oito reflectores responsáveis por gerar o código de identificação, mas neste caso estão distribuídos entre as duas saídas do transdutor interdigital de excitação. O princípio de funcionamento deste dispositivo é diferente do anterior, neste caso os ecos de identificação chegarão ao transdutor interdigital alternadamente de ambos os lados. Notar que para que seja obtido o resultado pretendido, o reflector 1 do dispositivo representado na figura 52 (b) se encontra a metade da distância do transdutor interdigital de excitação IDT1 que o reflector dois e assim sucessivamente para os outros reflectores. O numero de ordem dos reflectores equivale à ordem de chegada dos ecos ao IDT1. A grande vantagem desta estrutura é aproveitar as duas frentes de onda geradas pelo transdutor interdigital de excitação, aumentando a amplitude e regularidade dos ecos devolvidos pelo dispositivo SAW, sem necessitar de mecanismos de amortecimento de reflexões ou frentes de onda indesejadas nem litografia de resolução mais elevada do que a necessária para a produção de um transdutor interdigital uniforme.

Para não sobrecarregar ou tornar confusa a figura 52, não se representou um melhoramento possível da estrutura (b) da figura 52, que consistiria em adicionar no lado esquerdo onde inicialmente não existe reflector outro reflector (IDT3, figura 54), este colocado à uma distância que permita que ocorra interferência construtiva no transdutor interdigital IDT1 das frentes de onda provenientes de ambos os reflectores IDT2 e IDT3.

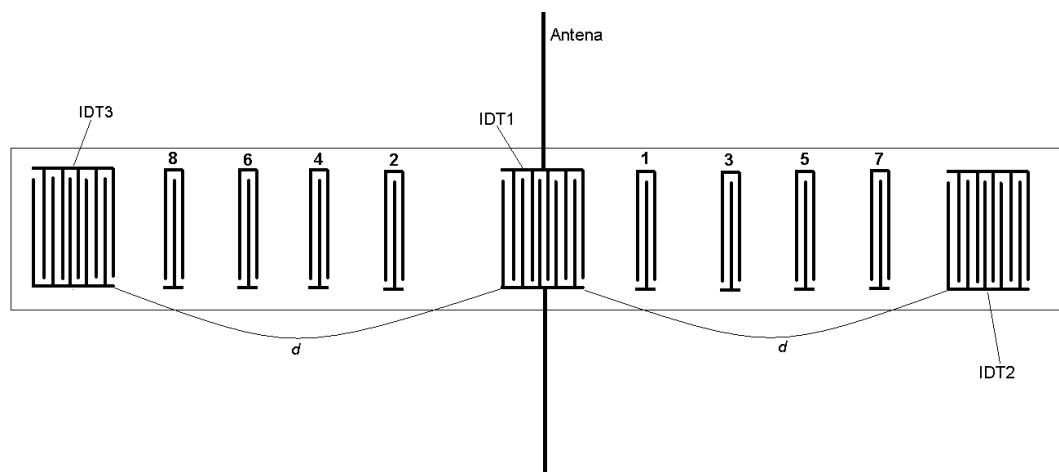


Figura 54 – Alteração à estrutura do dispositivo apresentado na figura anterior.

A principal desvantagem da solução apresentada por último, é a grande quantidade de substrato que é necessário utilizar em relação à solução apresentada no esquema (a) da figura 52. Neste caso o trabalho centra-se na produção de um dispositivo experimental, logo este não é um argumento de peso. Porém no caso de um dispositivo que se destine à produção em massa este pode ser um factor de relevo uma vez que a tendência natural na produção industrial é a produção do número máximo de dispositivos por bolacha.

Na próxima secção deste capítulo serão calculadas as restantes dimensões para o transdutor interdigital e reflectores: comprimento e número de pares de franjas.

Apesar de algumas das desvantagens que foram expostas em relação à estrutura apresentada no esquema (a) da figura 52, esta estrutura será desenhada e apresentada com mais detalhe adiante neste capítulo.

5.5 Modelação e simulação dos parâmetros do transdutor interdigital uniforme de excitação

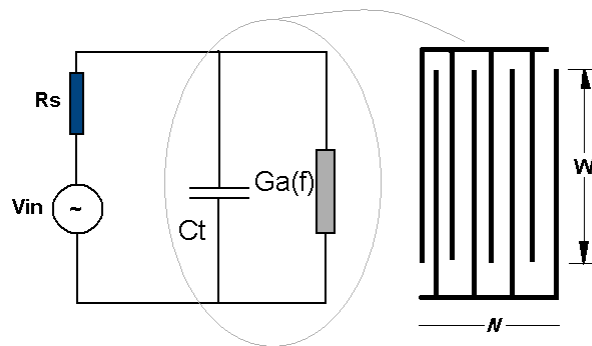
Já existe uma estrutura geral para o dispositivo SAW experimental, é chegada a altura de calcular a restante estrutura do transdutor interdigital uniforme de excitação, identificado como IDT1 na figura 52. O dispositivo SAW experimental está destinado a ser ligado a uma antena do tipo dipolo de meia onda por razões já abordadas neste capítulo. Como é sabido, este tipo de antena apresenta valores típicos de resistência de radiação entre 60Ω e 73Ω [39], logo é de vital importância que o transdutor interdigital apresente uma impedância de entrada semelhante à prevista para a antena o que facilitará a adaptação entre a antena e o SAW. Desta forma serão evitados ou até eliminados os métodos de adaptação de impedância que, se utilizados, provocarão perdas de energia inevitáveis.

Dos modelos abordados no capítulo quarto deste texto, o mais adequado e utilizado para o estudo da impedância de entrada de um transdutor interdigital uniforme em função das dimensões da sua estrutura, é o modelo de campo cruzado.

5.5.1 Modelação do transdutor interdigital uniforme, utilizando o modelo de campo cruzado

Como já foi abordado, o modelo de campo cruzado é o mais adequado para a obtenção da condutância de um transdutor interdigital, na transmissão ou recepção de ondas de superfície.

Segundo o modelo de campo cruzado, um transdutor interdigital uniforme pode ser modelado pelo circuito que se segue:



Com

C_0 - Capacidade/franja/unidade de comprimento

W - Comprimento das franjas

$$C_s = C_0 W \quad (5.3)$$

$$G_a(f_0) = 8K^2 f_0 C_s N^2 \quad (5.4)$$

$$Z_a = \frac{1}{G_a} \quad (5.5)$$

$f_0 = 433,92\text{MHz}$, frequência central de funcionamento do transdutor interdigital

N - Número de pares de franjas, a determinar

$K^2 = 0,1\%$, coeficiente de acoplamento electromecânico, para o quartzo corte ST

A capacidade C_t representa a capacidade total do transdutor interdigital, à partida e uma vez que a antena utilizada apresenta uma impedância característica puramente resistiva, esta capacidade poderá parecer problemática. Na realidade, o seu efeito pode ser anulado colocando-lhe uma indutância em paralelo. Logo, a análise do o valor da

condutância $G_a(f_0)$ que varia em função das dimensões físicas do transdutor interdigital, é o que permite a obtenção da estrutura final do transdutor interdigital.

Até agora desconhecem-se duas variáveis de $G_a(f_0)$ que representam os valores a obter para a estrutura final do transdutor interdigital, elas são o comprimento das franjas W e o número de pares de franjas N . Na próxima subsecção serão apresentadas algumas curvas obtidas a partir da simulação do modelo acabado de apresentar, em computador.

5.5.2 Simulação em computador

Depois de modelado o transdutor interdigital, continuam sem se conhecer duas variáveis que permitirão a obtenção da impedância de entrada, desejada para o transdutor interdigital uniforme de excitação.

A estratégia adoptada para a obtenção dos valores desconhecidos passa por variar o comprimento normalizado das franjas (W/λ), em função de um valor pré-estabelecido do número de pares de franjas. O valor pré-estabelecido para o número de pares de franjas é 250, Este valor foi obtido a partir da análise detalhada de algumas estruturas desenvolvidas para filtros em [2], que trabalham com impedâncias próximas das pretendidas para esta aplicação. Com este procedimento obtém-se uma curva representativa da impedância de entrada do transdutor interdigital em função do comprimento das franjas. Esta curva permite fixar um valor para o comprimento das franjas que se aproxime da impedância desejada.

Com o valor do comprimento das franjas, é possível desenhar uma nova curva, utilizando o mesmo modelo, desta vez variando o número de franjas.

A análise das várias curvas obtidas por simulação, possibilita que sejam escolhidos os valores adequados para comprimento e número de pares de franjas, que permitam a obtenção de uma impedância característica para o transdutor interdigital, igual ou próxima da gama apresentada para a antena proposta.

Em seguida, são apresentados alguns resultados da simulação do processo de cálculo descrito atrás. Os resultados obtidos baseiam-se na utilização do substrato de quartzo, escolhido com substrato para o dispositivo SAW experimental na secção 5.3 deste capítulo.

A simulação e obtenção das curvas podem ser feitas utilizando uma ferramenta de cálculo como o Matlab, Scicalc (clone minimalista “open source” do Matlab) ou até o Excel. Os gráficos apresentados foram feitos com base nas tabelas I, II e III fornecidas em anexo e que contem os resultados da simulação.

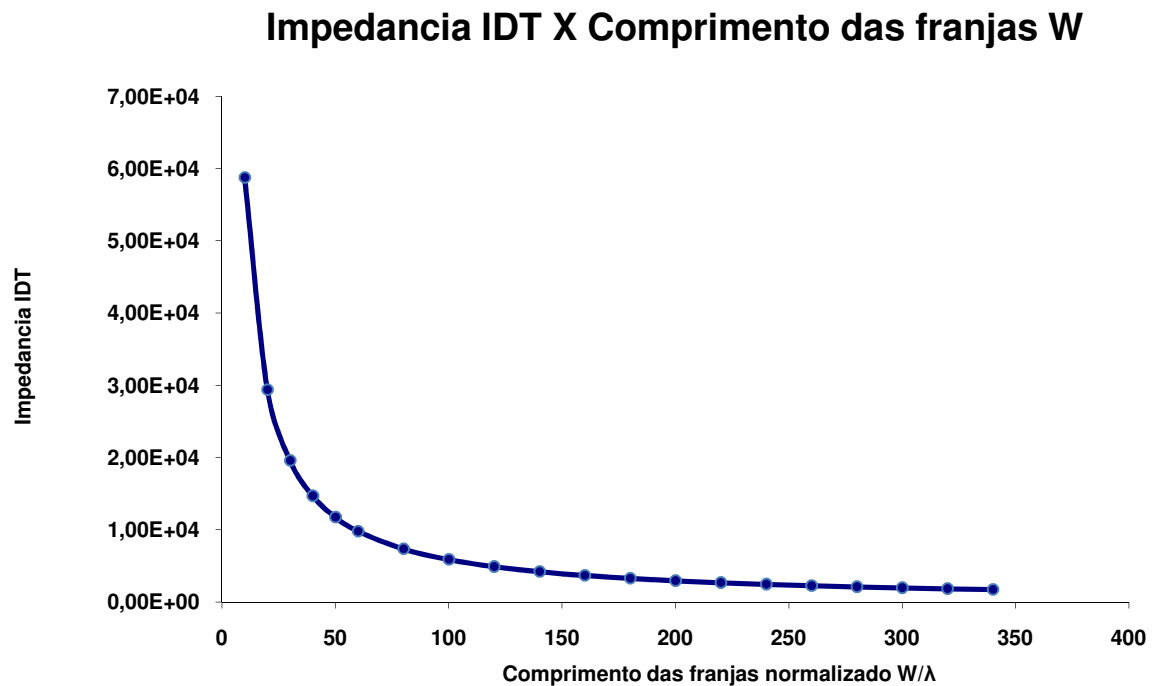


Figura 55 – Resultados obtidos por simulação utilizando o modelo de campo cruzado, para a impedância do transdutor interdigital em função do comprimento das franjas, com 250 de pares de franjas (valor preestabelecido).

O gráfico apresentado na figura 55, representa a variação da impedância de um transdutor interdigital, com o comprimento das franjas, tendo-se preestabelecido o valor 250 para o número de pares de franjas. Como se pode verificar, para comprimentos normalizados das franjas acima de 150λ , a variação da impedância do transdutor interdigital com o aumento do número de franjas passa a ser diminuta. Está-se numa zona onde o valor da impedância do transdutor interdigital já é baixo e tende a estabilizar. Isto quer dizer, que se for desenhado um transdutor interdigital, em que o comprimento das franjas varie entre 150λ e 325λ , se conseguem obter transdutores interdigitais com impedância de entrada baixa. Como a variação da impedância nesta zona é baixa, consegue-se maior reprodutibilidade das características dos dispositivos, se forem produzidos em massa. É de especial importância, desenhar um dispositivo com a robustez suficiente para que este sofra o mínimo possível com as tolerâncias de fabrico.

Da análise do gráfico anterior optou-se por seleccionar o valor de 200λ para o comprimento das franjas (W). Este valor apresenta-se como um compromisso que está de acordo com as questões abordadas no parágrafo anterior. Não se optou por utilizar um comprimento maior para as franjas visto que a partir de 200λ a diminuição da impedância do transdutor interdigital não é substancial, sendo no entanto o aumento da capacidade total do transdutor considerável (ver tabela I em anexo) o que iria dificultar a adaptação de impedância entre a antena e o sensor.

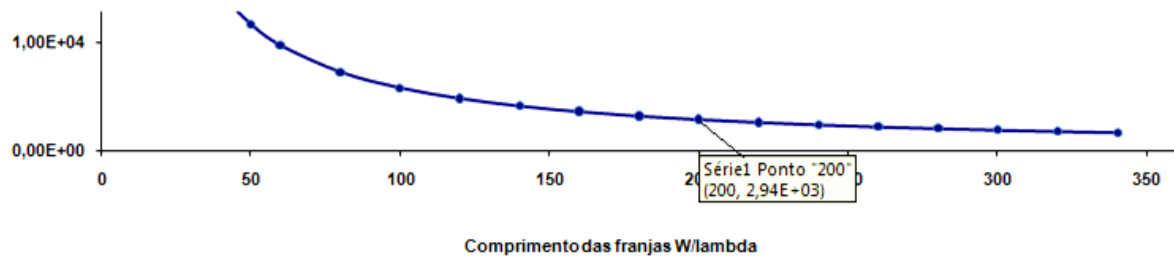


Figura 56 – Pormenor do gráfico anterior.

Com o valor 200λ para o comprimento das franjas já seleccionado, volta-se a simular o modelo, obtendo-se desta vez uma curva com o comportamento da impedância do transdutor interdigital em função do número de pares de franjas. A partir desta curva será possível obter o último valor importante para a definição da estrutura do transdutor interdigital de excitação, o número de pares de franjas.

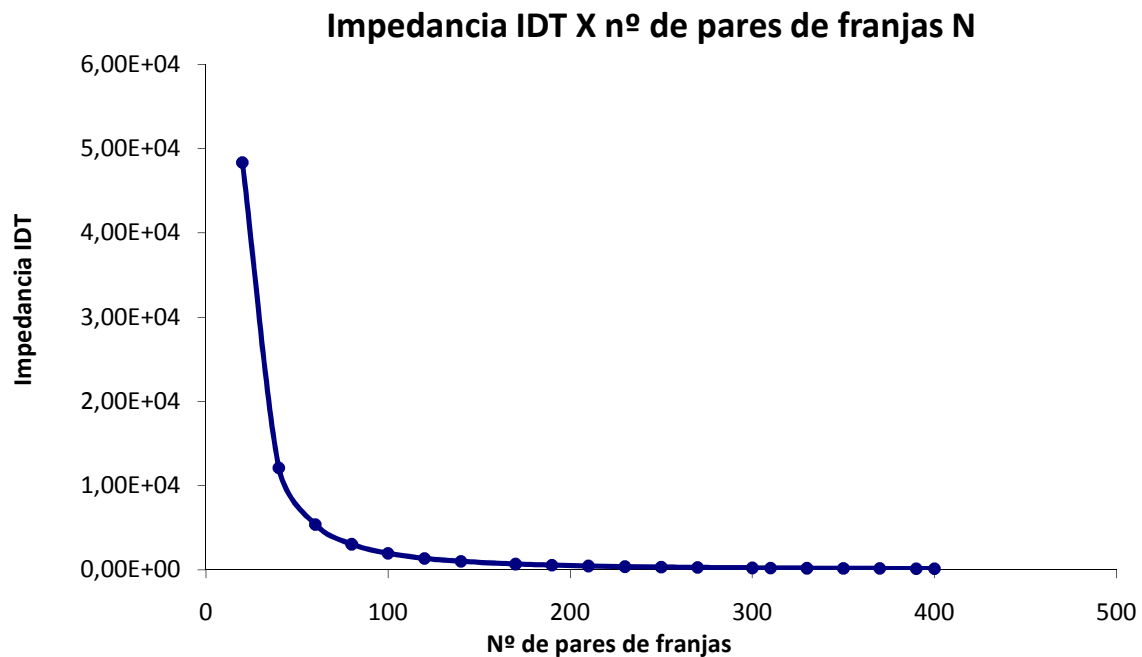


Figura 57 – Resultados obtidos por simulação utilizando o modelo de campo cruzado, para a impedância de um transdutor interdigital em função do número de pares de franjas.

Na figura 57, é apresentada uma curva que representa a impedância de um transdutor interdigital em função no número de pares de franjas, com o valor do comprimento das franjas fixado em 200λ .

O processo para obtenção do valor óptimo do número de pares de franjas, baseia-se num raciocínio análogo ao efectuado para obtenção do valor do comprimento das franjas. Começa-se por seleccionar uma zona onde a variação da impedância de entrada do transdutor interdigital em relação ao parâmetro que se pretende seleccionar comece a ser baixa, isto permite como já foi dito, a obtenção de dispositivos facilmente reproduzíveis e menos sensíveis às tolerâncias de fabrico.

O valor seleccionado para o número de pares de franjas (N) foi 300. Este valor apresenta um bom compromisso entre a impedância de entrada do transdutor interdigital 215Ω e a capacidade total do transdutor interdigital.

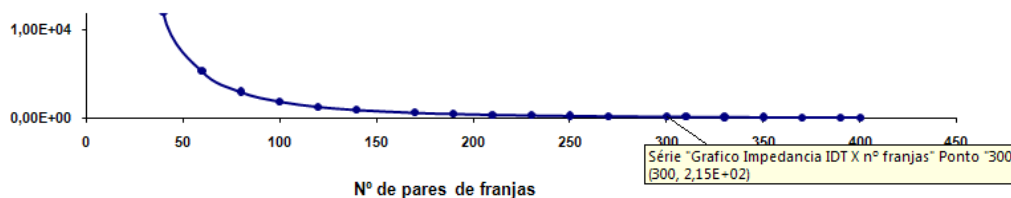


Figura 58 – Pormenor do gráfico anterior.

Agora que já estão seleccionados os valores para o comprimento das franjas 200λ e número de pares de franjas 300. Podem ser geradas curvas a partir do modelo do dispositivo onde se pode analisar a variação da espessura da camada metálica utilizada para a construção final do transdutor interdigital no substrato escolhido.

Salientar que o metal escolhido para o fabrico do transdutor interdigital e reflectores é o alumínio. Este é metal utilizado preferencialmente para o fabrico de dispositivos SAW, [2], [12] e [38]. A principal vantagem deste metal é apresentar uma boa relação densidade/conductividade, o que permite a obtenção de estruturas interdigitais com baixas perdas por resistividade das franjas e menos reflexões parasitas relacionadas com o peso das franjas. Este material tem também a vantagem de ser facilmente depositado sobre o quartzo e de ter características de elasticidade semelhantes ao quartzo o que favorece a durabilidade e integridade das estruturas quando o substrato estiver sujeito a deformações relacionadas com o processo de medida de grandezas físicas.

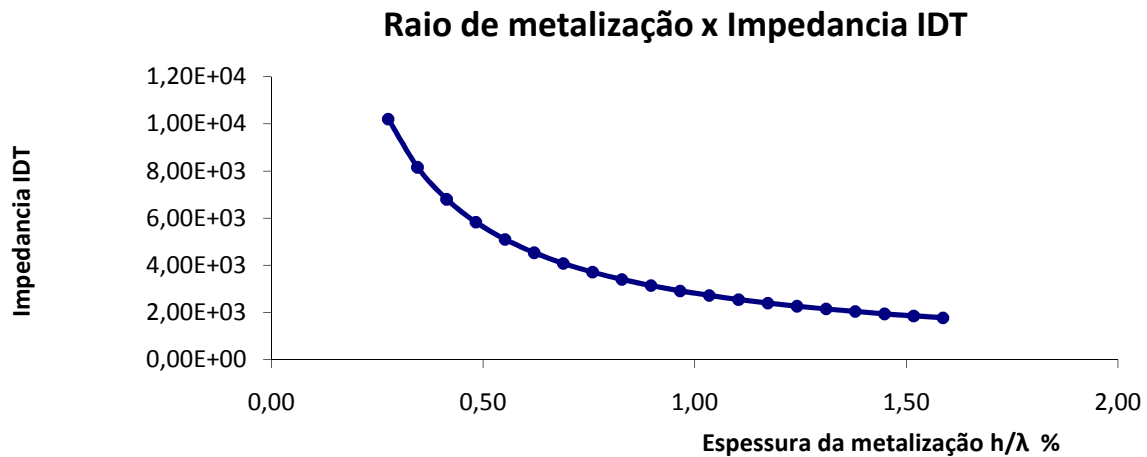


Figura 59 – Variação da impedância de um transdutor interdigital com 300 pares de franjas de comprimento 200λ em função do raio de metalização.

Segundo [2], os valores para o raio de metalização h/λ (espessura da camada de metal sobre o comprimento da onda superficial), deverá ser preferencialmente menor ou próximo de 1%.

5.6 – Estrutura final do transdutor interdigital uniforme de excitação e reflectores

Com base nos cálculos, opções de engenharia e resultados obtidos por simulação do modelo equivalente do transdutor interdigital uniforme de excitação, chegou-se à estrutura final que a seguir se descreve. Os parâmetros obtidos são, em síntese:

- Substrato, quartzo corte ST eixo de propagação X, $K^2 = 0,1\%$
- Frequência central de funcionamento $f_0 = 433,92\text{MHz}$
- Comprimento das ondas superficiais no quartzo $\lambda = 7,28\mu\text{m}$
- Largura das franjas e separação entre franjas consecutivas $= \lambda/4 = 1,82\mu\text{m}$
- Comprimento das franjas $W = 200\lambda \approx 1,45 \times 10^{-3}\text{m}$
- Numero de pares de franjas $N = 300$
- Metal a utilizar na construção das estruturas, alumínio
- Espessura da metalização das franjas (dependente das tolerâncias de fabrico)
 $h \approx 90\text{nm}$

A figura 60 esquematiza a informação correspondente à estrutura do transdutor interdigital uniforme de excitação e substrato do dispositivo SAW experimental.

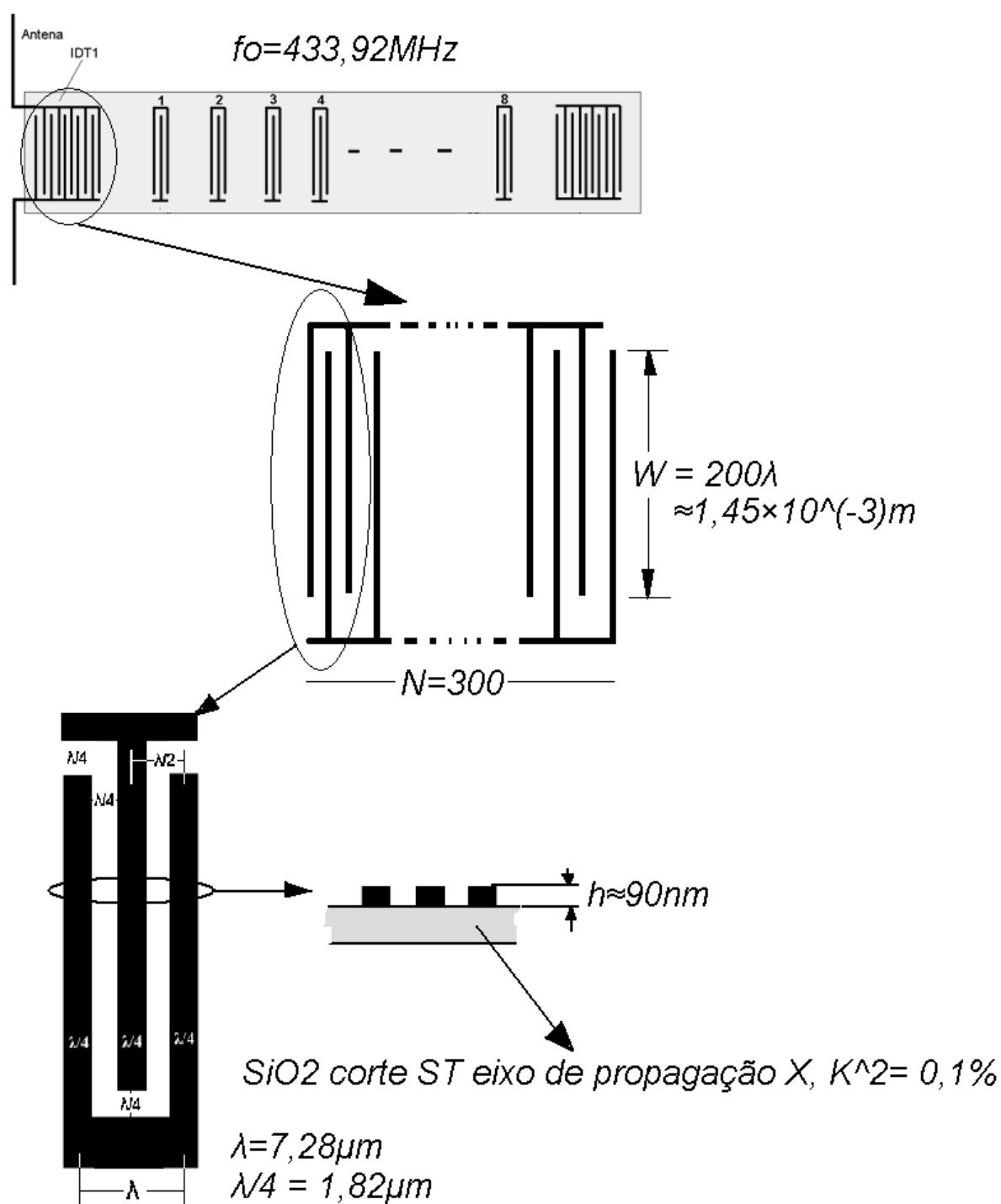


Figura 60 – Estrutura detalhada do transdutor interdigital uniforme de excitação.

5.6.1 – Estrutura dos reflectores

Com a estrutura do transdutor interdigital uniforme de excitação (IDT1) já definida, resta definir a estrutura e distância dos reflectores. Como os reflectores vão ficar alinhados com o transdutor interdigital de excitação e para que possam estar expostos à totalidade da frente do onda superficial que os irá atingir, eles são desenhados com franjas do mesmo comprimento das franjas do transdutor interdigital de excitação. Ou seja as franjas dos reflectores terão um comprimento de $W=200\lambda \approx 1,45 \times 10^{-3}m$.

A largura das franjas e a separação entre franjas consecutivas é como no caso do transdutor interdigital descrito atrás, dependente do comprimento de onda da onda superficial gerada. Os reflectores utilizados são no fundo transdutores interdigitais que estão ligados ao mundo exterior por condutores finos (*bond wires*) e que consoante a impedância a que estarão ligados seja ou não a sua

impedância característica, se irão ou não comportar como reflectores. Assim a largura das franjas e a separação entre franjas consecutivas serão idênticas aos valores obtidos atrás para o transdutor interdigital IDT1, ou seja $\lambda/4 = 1,82\mu m$.

Resta calcular o número de pares de franjas que terá cada reflector. Os oito primeiros reflectores, responsáveis por gerar o código de identificação deverão ser atingidos pela frente de onda superficial e deverão reflectir uma fracção da energia incidente, de modo a que a frente de onda incidente possa prosseguir e encontrar-se com outros reflectores, gerando assim o conjunto de ecos característico de um determinado valor utilizado para a identificação do dispositivo. Logo, o reflector apropriado será aquele capaz de gerar um eco com duração detectável no receptor e que permita que a maior parte da energia mecânica associada à frente de onda se continue a propagar.

Após a análise do funcionamento de um circuito hipotético capaz de receber e amplificar ecos e posteriormente detectar e identificar padrões, utilizando um micro controlador

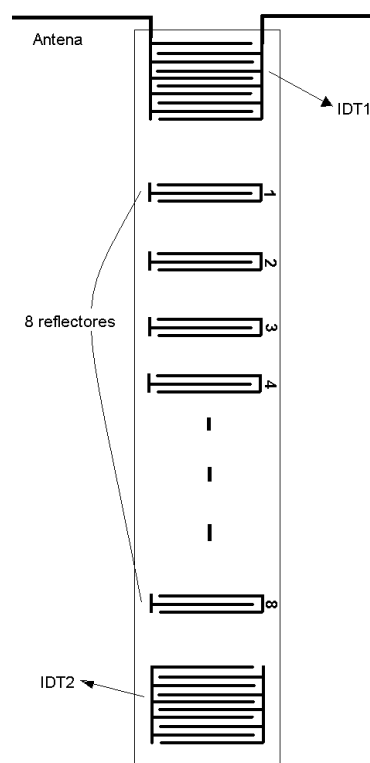


Figura 61 – Estrutura do dispositivo SAW experimental.

vulgar, conclui-se que os ecos deverão ter uma duração de aproximadamente 50ns. Assim com base em [12] e [38], pode-se calcular o número de pares de franjas dos oito reflectores, obtendo-se um eco com a duração desejada, da seguinte forma:

$$f_0 = \frac{V_{SAW}}{\lambda} \quad (5.6)$$

$$B = \frac{1}{\tau} = \frac{V_{SAW}}{L} = \frac{V_{SAW}}{N\lambda} \Rightarrow N = \frac{\tau V_{SAW}}{\lambda} \quad (5.7)$$

$$N = \frac{50ns \times 3158m/s}{7,28\mu m} = 21,67 \rightarrow 22 \text{ pares de franjas}, \quad (5.8)$$

com

$$V_{SAW} = 3158m/s$$

$$\lambda = 7,28\mu m$$

$$\tau - \text{Duração do eco} = 50ns$$

$$N - \text{Número de pares de franjas}$$

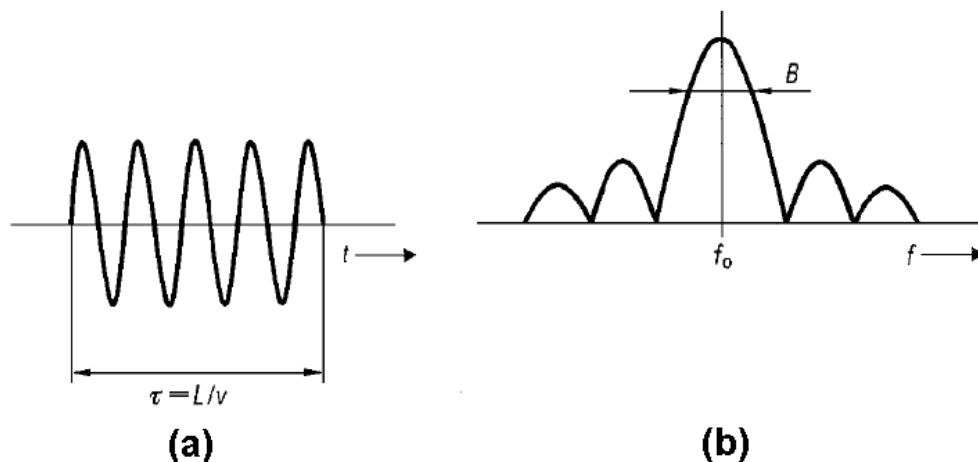


Figura 62 – Processo anterior ilustrado no domínio do tempo em (a) e no domínio da frequência em (b).

Os oito primeiros reflectores terão a seguinte estrutura:

- Comprimento das franjas, $W=200\lambda \approx 1,45 \times 10^{-3}m$
- Largura das franjas e separação entre franjas consecutivas, $\lambda/4 \approx 1,82\mu m$
- Número de pares de franjas, $N=22$
- Espessura da metalização por conseguinte das franjas (dependente das tolerâncias de fabrico) $h \approx 90nm$

Resta apresentar a estrutura do reflector final, representado por IDT2 na figura 61, destinado à medição de grandezas físicas. Quanto a este reflector não há muito a dizer pois não existe a necessidade de ser ultrapassado pela frente de onda, assim optou-se por utilizar uma estrutura igual à do transdutor interdigital uniforme de excitação, IDT1 na figura 61. Esta solução permite à partida, uma melhor flexibilidade em termos das experiências e grandezas que poderão ser medidas, utilizando o dispositivo SAW experimental. Com chamada de atenção para o capítulo três, secção 3.2 deste texto, onde se salienta a aplicação de uma carga variável a um dispositivo SAW, figura 63.

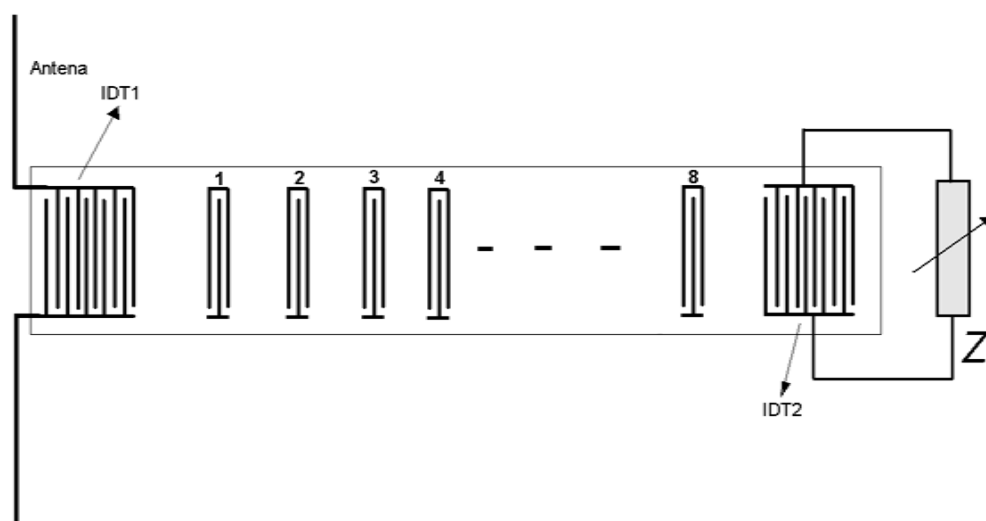
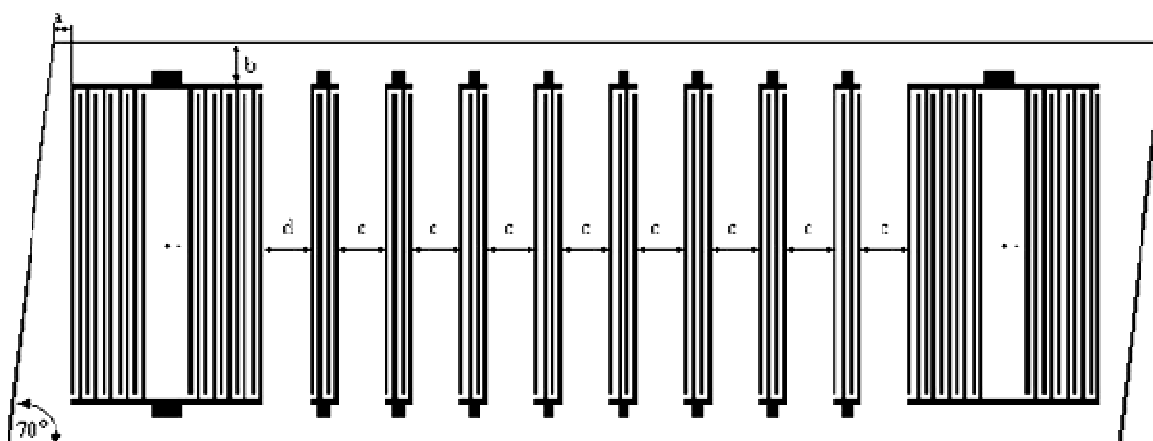


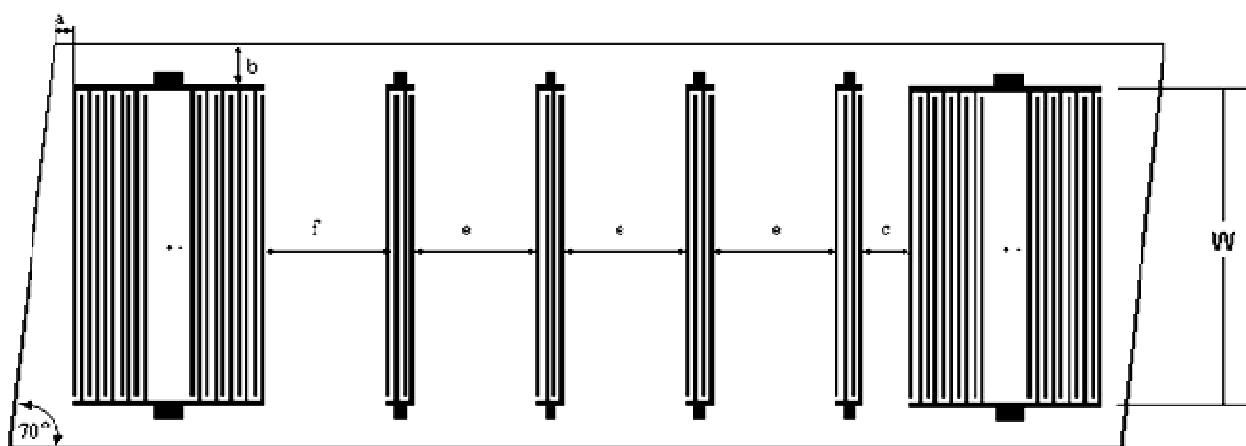
Figura 63 – Utilização do dispositivo SAW experimental, com medição utilizando carga variável.

5.7 Estrutura final do dispositivo SAW experimental

Na figura que se segue são apresentados dois esquemas com as estruturas finais de dois dispositivos SAW experimentais. As figuras não estão à escala para facilitar a compreensão das estruturas, mas representam a implantação final do transdutor interdigital e reflectores calculados atrás no substrato.



(a)



(b)

Figura 64 – Duas estruturas para o dispositivo SAW experimental, em (a) utilizam-se oito reflectores para gerar o código de identificação, espaçados entre si $700\mu\text{m}$. Em (b) são usados apenas quatro reflectores espaçados entre si $1400\mu\text{m}$.

Dimensões:

$$a = 1\text{mm}$$

$$b = 0,5\text{mm}$$

$$c = 700\mu\text{m}$$

$$d,e,f = 1400\mu\text{m}$$

As diferenças entre ambas as estruturas estão no número de reflectores utilizados para gerar o código de identificação e na separação entre reflectores. Em (a) o tempo entre ecos é cerca de 400ns, este tempo ou separação entre ecos foi definido de modo a que os ecos possam ser devidamente detectados e ainda sobre tempo suficiente para um micro-controlador comum efectuar cálculos adicionais relacionados com o processamento da informação recebida.

Ambas as estruturas apresentam uma separação de 1400 μm entre o transdutor interdigital de excitação e o primeiro reflector. Esta separação implica que o primeiro eco chegue no mínimo aproximadamente 800ns após a irradiação do dispositivo. Este tempo baseia-se na necessidade de existir um tempo para a comutação da unidade electrónica de leitura para modo de escuta e principalmente na necessidade de um tempo de latência que permita o desaparecimento de eventuais ecos provenientes do ambiente circundante que é inevitavelmente, irradiado juntamente com o dispositivo SAW a questionar, [12].

São de salientar também os dois cortes laterais a 70° na lâmina de quartzo onde as estruturas interdigitais estão desenhadas. Estes cortes são feitos a cerca de 1mm do transdutor interdigital de excitação e do último reflector. Servem no primeiro caso para eliminar uma das frentes de onda gerada pelo transdutor interdigital de excitação, que caso não existisse esse corte seria reflectida ao atingir o limite do substrato podendo causar interferências destrutivas com os ecos gerados pelos reflectores. No último caso a função é eliminar eventuais reflexões parasitas causadas pela porção da frente de ondas superficiais que em alguns casos poderá ultrapassar o último reflector e com o processo de fabrico dos dispositivos.

5.7.1 Fenómenos de difracção e região de Fresnel

Um fenómeno que ocorre e que é importante verificar, é o fenómeno da difracção da frente de ondas de superfície. Este fenómeno é bastante complexo e foi estudado durante vários anos. Existe um tratamento mais detalhado deste assunto em [2]. Como está ilustrado na figura 65, o fenómeno de difracção consiste no aumento do tamanho da frente de onda com o afastamento desta em relação ao transdutor interdigital que a gerou. A principal e óbvia desvantagem deste fenómeno, é a diminuição da amplitude da frente de onda, resultado da divisão da energia mecânica contida na mesma por um espaço maior. Para distâncias superiores à região de Fresnel, figura 65, a energia mecânica pode estar distribuída por lobos, existindo lobos principais e secundários, como se de um diagrama de radiação de uma antena se tratasse. Estar fora da região de Fresnel, pode significar uma resposta débil ou errada de um dispositivo SAW, ou fraca amplitude dos ecos produzidos, fruto das reflexões parasitas e interferências destrutivas entre frentes de onda, que se podem criar.

Uma vez que o dispositivo SAW experimental trabalha com base em atrasos consideráveis, fruto do espaçamento entre o transdutor interdigital de excitação e os vários reflectores, é importante verificar se a pior situação para a separação entre o transdutor interdigital de excitação e o último reflector, se encontra dentro da região de Fresnel.

Segundo [2], para um meio anisotrópico o parâmetro de difracção F é dado por:

$$F = \frac{\lambda D(1-2Ad)}{W^2} \quad (5.9)$$

F – Parâmetro de difracção

λ - Comprimento da onda superficial

W - Comprimento das franjas do transdutor interdigital (gerador)

D - Distancia entre o observador e o gerador

Ad - É um parâmetro de anisotropia característico do Quartzo (estando o seu valor tabelado)

Para estar na região de Fresnel, o parâmetro de difracção F deve ser menor do que um [2].

$$F < 1 \quad (5.10)$$

A equação que fornece o parâmetro F pode ser reescrita da seguinte forma, fornecendo a distância máxima admissível para estar na região de Fresnel:

$$D = \frac{FW^2}{\lambda(1 - 2Ad)} \quad (5.11)$$

Tendo em conta o dispositivo SAW experimental:

$$F < 1, \text{ usa-se } F = 0,95$$

$$\lambda = 7,28\mu m$$

$$Ad = -0,18, \text{ parâmetro de anisotropia para o quartzo corte ST, [2]}$$

$$W = 200\lambda \approx 1,45 \times 10^{-3}m$$

Tem-se:

$$D = \frac{0,95 \times (1,45 \times 10^{-3})^2}{7,28 \times 10^{-6} (1 - 2(-0,18))} = 0,76m \quad (5.12)$$

Com este resultado para a distância máxima admissível para estar na região de Fresnel, entre o transdutor interdigital gerador e potenciais reflectores ou transdutores interdigitais, não existe qualquer dúvida de que o dispositivo SAW experimental, que tem vindo a ser exposto neste capítulo, se encontra dentro da região de Fresnel muito abaixo do limite máximo sendo então desprezáveis eventuais fenómenos de difracção. Uma vez que nenhuma das duas variantes do dispositivo SAW experimental apresentadas excede os 9mm de distância entre o transdutor interdigital de excitação e o último reflector.

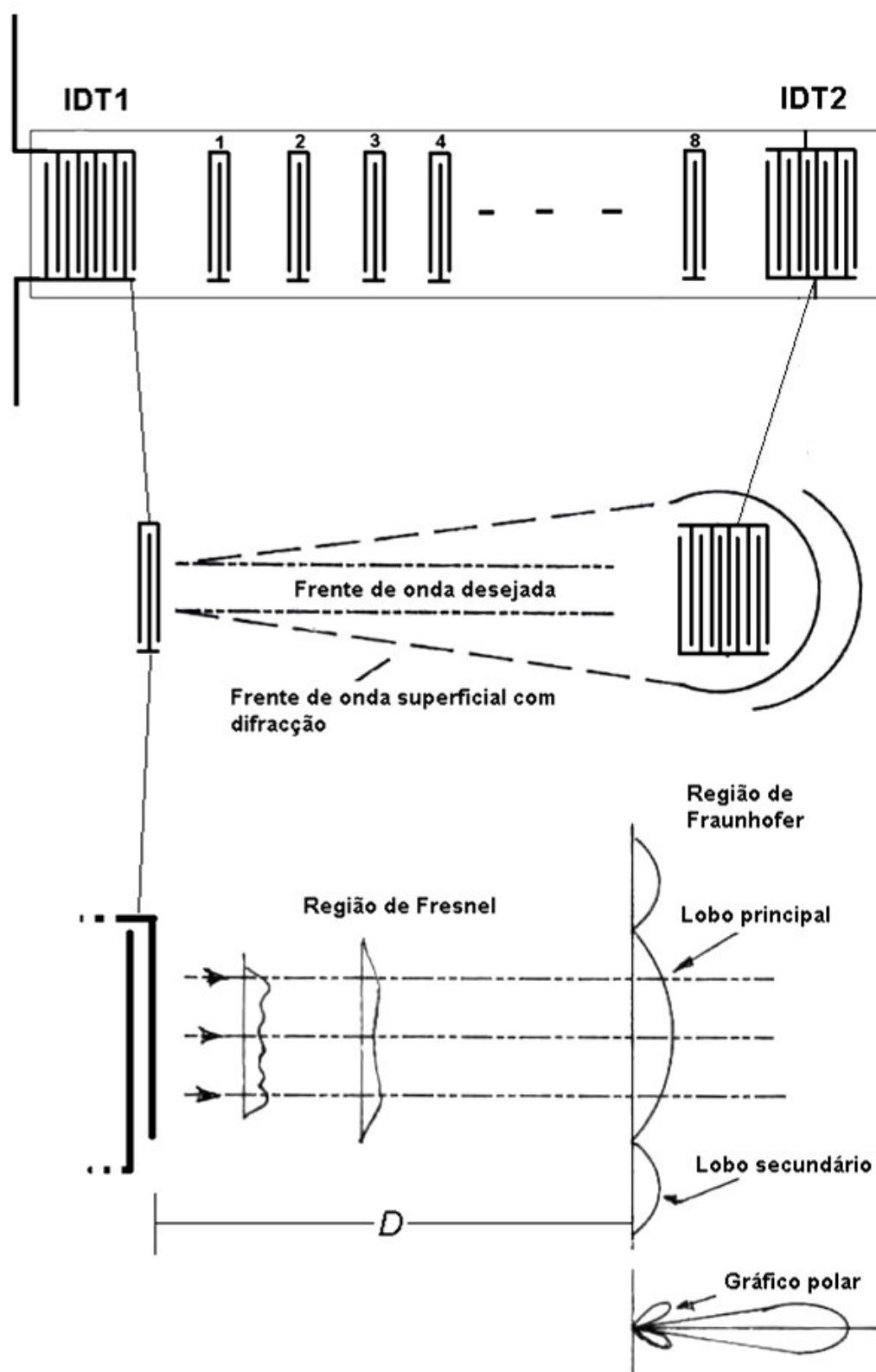


Figura 65 – Ilustração do fenómeno de difracção de uma frente de onda superficial.

5.7.2 Largura de banda do dispositivo SAW experimental

Apesar do dispositivo SAW apresentado neste capítulo ter fins experimentais, é importante verificar a sua largura de banda de operação. E embora este ponto não tenha sido devidamente clarificado na secção 5.5 deste texto por questões de simplicidade de compreensão, a largura de banda final do dispositivo e o seu ajuste às normas foi um factor tido em consideração para a escolha do valor do número de pares de franjas do transdutor interdigital de excitação. Com base em [12] e [38] a largura de banda B de funcionamento de um transdutor interdigital é dada por:

$$B = \frac{V_{SAW}}{N\lambda} \quad (5.13)$$

Com:

V_{saw} – Velocidade de propagação das ondas de superfície = $3158m/s$

N – Número de pares de franjas do transdutor interdigital = 300

λ – Comprimento das ondas de superfície = $7,28\mu m$

Então,

$$B = \frac{3158}{300 \times 7,28 \times 10^{-6}} \approx 1,45MHz. \quad (5.14)$$

A banda ISM dedicada aplicações industriais, científicas e médicas dos 433,05MHz a 434,79MHz, segundo o quadro de atribuição de frequências português [23], permite uma largura de banda de 1,74MHz. Este valor é perfeitamente compatível com a largura de banda prevista para o transdutor interdigital de excitação do dispositivo SAW experimental apresentado neste capítulo, representando no fundo a largura de banda total do respectivo dispositivo.

5.8 Pormenores de implantação física (*layout*) dos dispositivos

A espessura da camada de alumínio que compõe as franjas é aproximadamente 90nm. Diz-se aproximadamente porque o processo de fabrico destes dispositivos está sujeito às tolerâncias de fabrico. No entanto, as zonas onde serão ligados os *bond wires* e as barras de alimentação das franjas podem e devem ser mais espessas. Desta forma diminui-se a resistência eléctrica entre a alimentação e as franjas, evitando as perdas e aproximando o comportamento das estruturas interdigitais do ideal.

Na figura 66 é apresentado um pormenor do *layout* de um reflector que compõe a cadeia de codificação do dispositivo SAW experimental. O gradiente de preto para cinza, ilustra como deve variar a espessura da camada de metal. A zona a preto pode ter espessuras entre 0,2 μ m e 1 μ m, consoante a tecnologia e a tolerância de fabrico. Depois existe uma zona de transição e a seguir a zona das franjas com o tom mais claro e uma espessura de metalização de aproximadamente 90nm.

As bases para ligação dos *bond wires* tipicamente em alumínio, cobre ou ouro são vulgarmente conhecidas por *pads*. Os *pads* são regiões quadradas de metal neste caso alumínio com dimensões 100 μ m x 100 μ m. Estas dimensões foram escolhidas com base nas dimensões típicas para este tipo de ligações nos circuitos integrados.

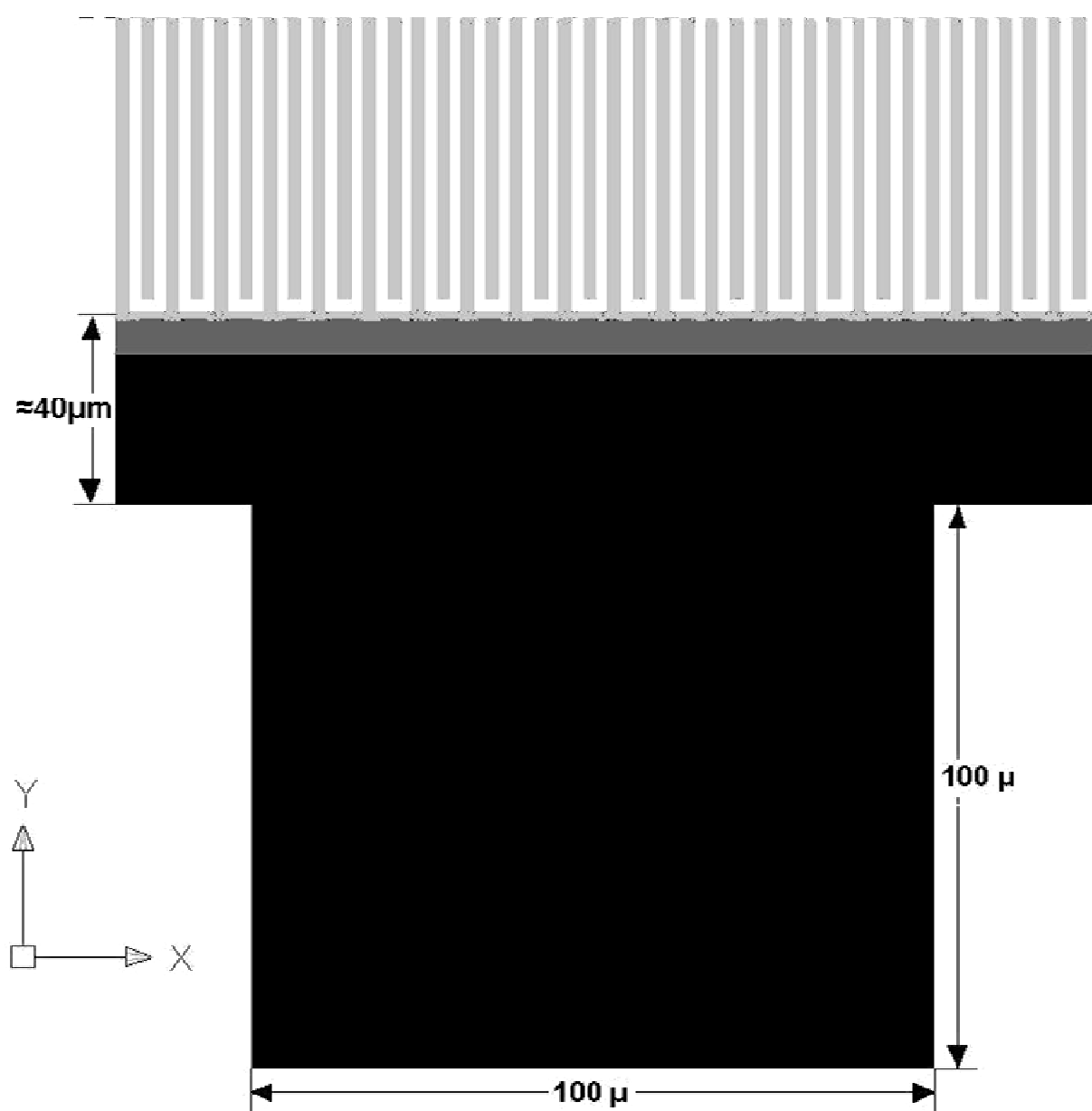


Figura 66 – Pormenor do *layout* de um reflector.

6

Ensaaios laboratoriais e electrónica de suporte



Já foi descrito o desenho de um dispositivo SAW experimental, este capítulo destina-se à apresentação de alguma electrónica de suporte e ensaio. Serão também abordadas as técnicas de medição das grandezas físicas a partir da análise dos sinais dos ecos de dispositivos SAW.

6.1 Introdução

As potencialidades dos dispositivos SAW, só poderão ser exploradas se existirem sistemas electrónicos eficazes e de reduzidas dimensões. Um marco decisivo para a concepção destes sistemas foi a massificação do uso de micro-controladores. Com estes é possível construir unidades de leitura com tamanhos reduzidos.

As unidades de leitura para dispositivos SAW funcionam de forma similar aos sistemas de radar. Os sistemas de leitura começam por irradiar o dispositivo SAW com um impulso à frequência central de funcionamento do transdutor interdigital de excitação do SAW, em seguida comutam para modo de escuta. Geralmente existe um tempo de latência destinado ao desaparecimento de ecos provenientes do ambiente que rodeia o sensor, depois a unidade de leitura recebe os ecos provenientes do sensor. Analisando o número e ordem dos ecos, pode ser identificado um dispositivo, a partir do atraso, variação de frequência ou variação de fase de um eco, podem ser medidas grandezas físicas.

Neste capítulo serão apresentados os principais métodos de detecção de grandezas físicas e alguns dispositivos electrónicos para ensaio em laboratório.

6.2 Unidade de leitura

Independentemente do tipo de sensor utilizado ou da grandeza a medir, um sensor baseado em SAW responde com uma versão distorcida, em amplitude, fase ou tempo, do sinal com que foi irradiado. As unidades de leitura destes dispositivos, baseiam-se como já foi dito em técnicas similares ao radar. As unidades de leitura são compostas por um transmissor e um receptor, geralmente ambos estão construídos no mesmo circuito o que permite, que o oscilador local do transmissor seja partilhado com o receptor, implementando-se a detecção coerente, [1], [12], [16], [20], [27], [28], [33] e [35].

6.2.1 Amostragem no domínio do tempo

Neste tipo de amostragem a unidade de leitura transmite um impulso de curta duração. Cada um destes impulsos faz com que o sensor gere um impulso de resposta atrasado no tempo e é esse atraso que transporta a informação relativa à grandeza a medir.

A resolução no tempo é conseguida por um impulso de rádio frequência que cobre a totalidade da largura de banda do sensor de uma vez. Para evitar interferências entre símbolos, a amostragem no receptor terá de ser feita com grande rapidez, no mínimo ao dobro da largura de banda do sensor.

Este tipo de amostragem permite que a leitura de um sensor seja feita a taxas elevadas sendo este método apropriado para a medição de grandezas que sofram rápidas variações ou na detecção de objectos que se mova a grandes velocidades.

Neste tipo de amostragem, a duração do sinal de leitura é geralmente muito mais baixa do que o tempo de duração da resposta. Como o impulso de leitura tem uma duração bastante limitada, toda a energia entregue ao sensor terá de estar contida nesse impulso de leitura. Logo utilizando esta técnica a distancia de leitura será relativamente baixa. Outro problema relacionado com a necessidade de comutação rápida, é a necessidade de utilizar circuitos electrónicos mais complexos e por conseguinte as unidades de leitura são mais dispendiosas.

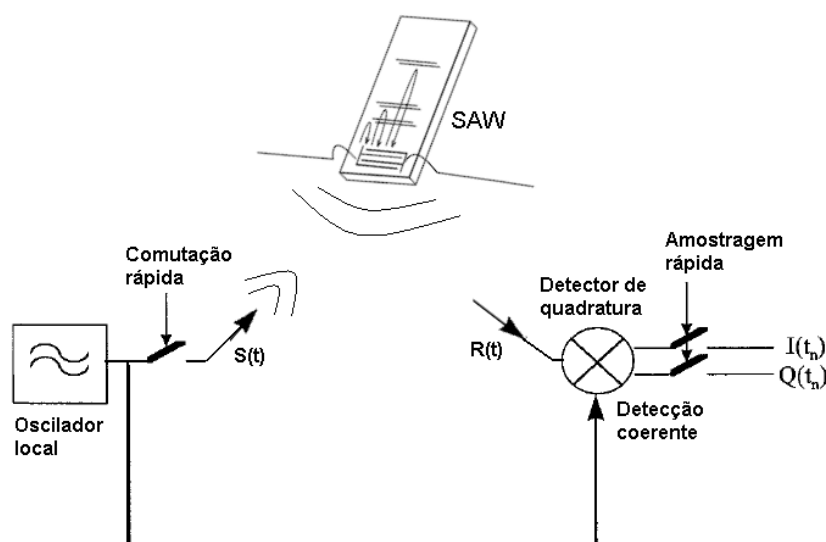


Figura 67 – Estrutura de uma unidade de leitura baseada, baseada em amostragem no domínio do tempo.

Aplicando nestas unidades as técnicas de compressão de impulso utilizadas nos sistemas de radar, pode ser aumentada a energia contida num impulso de leitura aumentando-se desta forma a distância de leitura.

6.2.2 Amostragem no domínio da frequência

Ao aplicar uma tensão ou deformação no substrato de um sensor baseado em SAW, a velocidade de propagação das ondas de superfície vai ser alterada, aumentando ou diminuindo consoante a contracção ou expansão do substrato, o que provoca variação na frequência dos ecos. A amostragem no domínio da frequência consiste em varrer a totalidade da largura de banda do sensor, degrau a degrau no domínio da frequência. Para que se possa ter uma elevada resolução de leitura a largura de banda de cada degrau no domínio da frequência terá de ser baixa, o que requer um sinal de leitura relativamente longo, implica o aumento do tempo de leitura e a quantidade de energia transmitida ao sensor. O que melhora a distancia de leitura dos sensores. No entanto é conveniente que o impulso de leitura embora longo, não ultrapasse o atraso que o dispositivo SAW obriga nos ecos de resposta. Nesse caso, o *duplexer* que é utilizado entre a antena, a saída do transmissor e a entrada do receptor terá que ser substituído por um circulador e um amplificador de baixo ruído com grande gama dinâmica. O que irá tornar mais complexa e dispendiosa a unidade de leitura.

Se esta técnica for utilizada para obter a informação relativa a N pontos no domínio do tempo, terão de ser varridas N frequências, dentro da largura de banda do sensor. Depois o sensor irá responder com um eco à frequência para a qual o seu transdutor interdigital de excitação se encontra “sintonizado” como consequência da deformação imposta ao substrato. Finalmente a informação proveniente do sensor no domínio do tempo, poderá ser obtida, utilizando-se uma transformação da frequência para o domínio do tempo, implementando por exemplo um algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) num micro controlador. O tempo total de uma medição é superior a N vezes o tempo de uma medição no domínio do tempo. Mesmo assim esta técnica é muito utilizada para medidas relativamente lentas que exijam elevada exactidão a distâncias maiores.

As técnicas de amostragem na frequência melhoram a relação sinal ruído. No entanto a amplitude e fase do sinal recebido tem que ser detectadas pelo receptor, para que a complexidade e custo da unidade de leitura sejam mais baixos. À semelhança das unidades de leitura baseadas na amostragem no tempo, o sinal do oscilador local do transmissor pode ser utilizado pelo receptor para fazer a detecção coerente dos sinais.

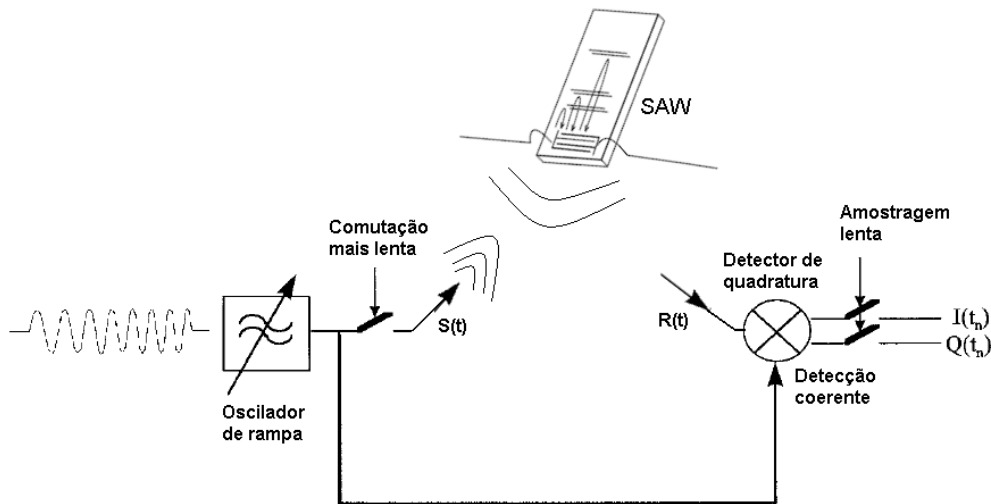


Figura 68 – Estrutura de uma unidade de leitura baseada, baseada em amostragem no domínio da frequência.

6.3 Transmissor para 433,92MHz, com largura de impulso ajustável

Tendo em vista o teste do dispositivo SAW experimental, foi desenvolvido um transmissor para 433,92MHz com largura de impulso variável. Neste sistema a largura e separação entre impulsos é controlada por um micro controlador, que supervisiona o funcionamento do bloco de rádio frequência. O dispositivo foi dotado de software que possibilita a configuração do sistema. A configuração da largura e separação entre impulsos é feita utilizando um simulador de terminal de texto o qual comunica com sistema via porta série.

O circuito do transmissor consiste num oscilador baseado num ressoador SAW que fixa a frequência de funcionamento nos 433,92MHz. O estado de funcionamento do oscilador é controlado por um sinal de controlo proveniente do porto RB7 do micro

controlador PIC18F252, utilizando um transistor de comutação rápida igual ao utilizado no oscilador, figura 69. Na simulação do circuito, foi utilizado o modelo de parâmetros concentrados do ressonador fornecido pelo fabricante. O par L2, C2 serve para adaptar a impedância da antenna ao oscilador, neste caso a antenna utilizada foi um dipolo de $\lambda/2$. Porém o valor de L2, C2 pode ser ajustado permitindo a adaptação do transmissor a outras antenas.

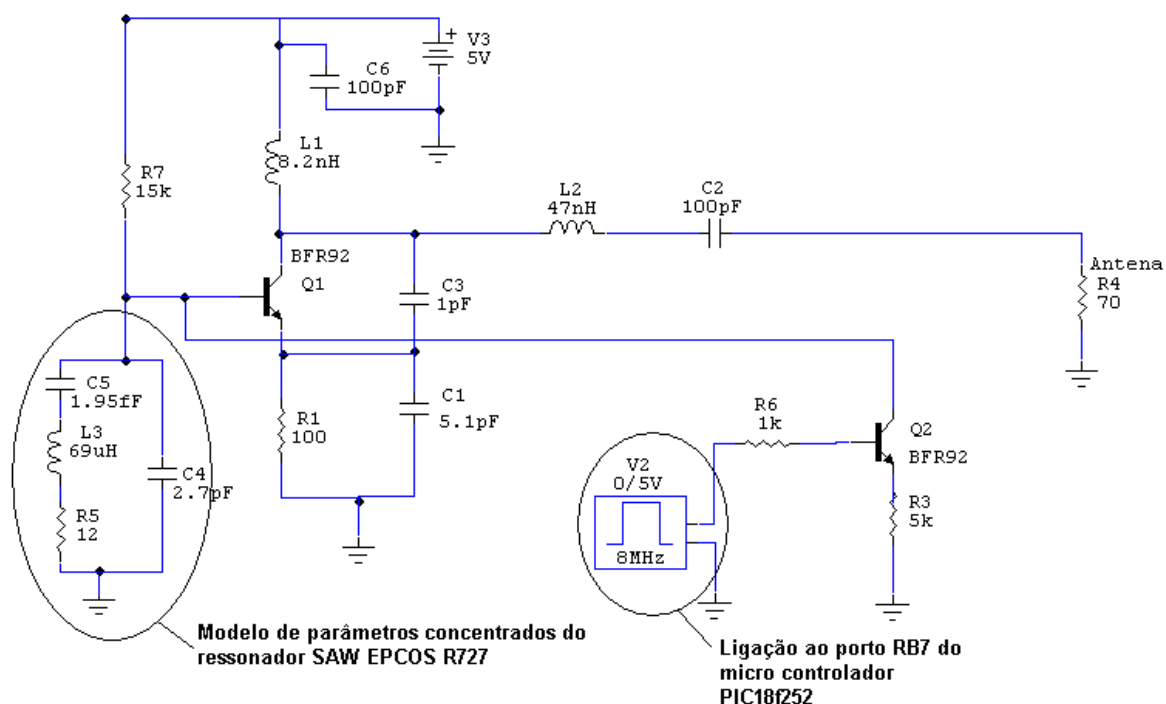
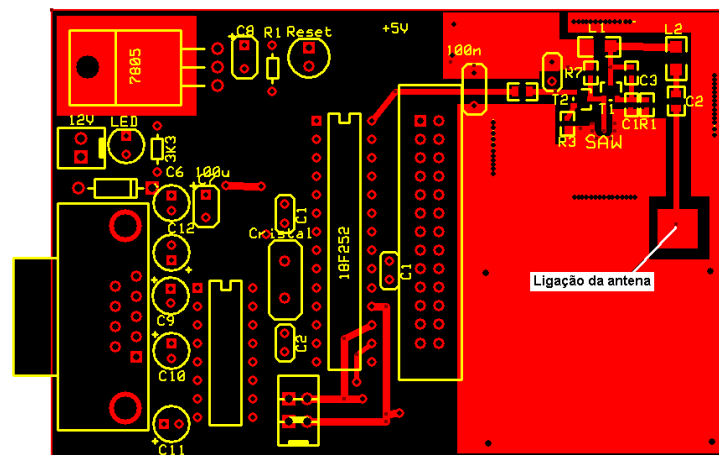


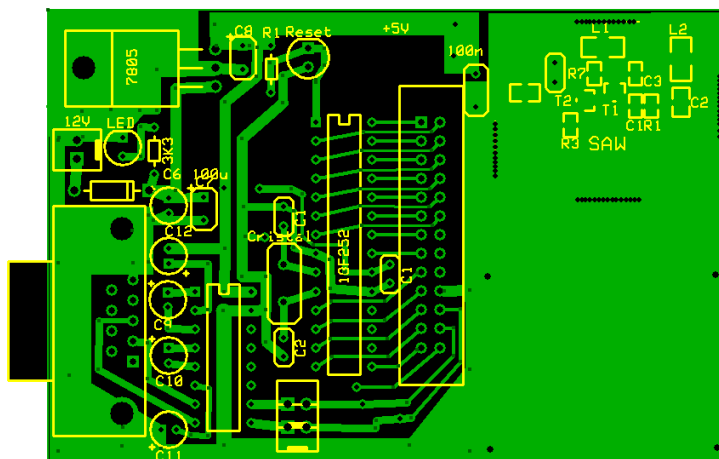
Figura 69 – Circuito do bloco de rádio frequência do transmissor para 433,92MHz.

Os circuitos impressos onde foi montado o circuito são apresentados em seguida. O transmissor foi montado com componentes SMD, diminuindo-se desta forma os comprimentos das pistas e eventuais capacidades parasitas.

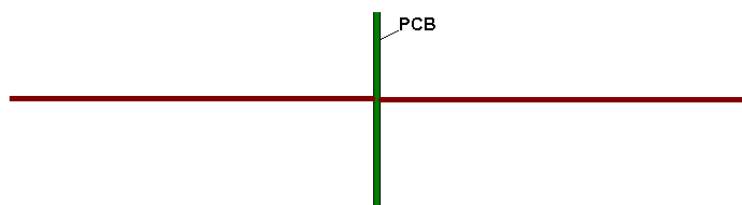
A antena utilizada foi um dipolo de $\lambda/2$, tendo sido soldada uma das hastes na zona destinada à ligação da antena e a outra exactamente atrás no plano de massa do transmissor, ver figura seguinte:



(a)



(b)



(c)

Figura 72 – Montagem em circuito impresso do transmissor para 433,92MHz, (a) frentes, (b) verso e (c) aspecto final do dispositivo com a antena montada.

7

Conclusões e desenvolvimentos futuros



Conclusões tiradas do trabalho efectuado e propostas para desenvolvimentos futuros.

7.1 Conclusões

Conclui-se que os dispositivos SAW apresentam uma alternativa viável aos sensores tradicionais que tipicamente necessitam de alimentação eléctrica. É uma área em franca expansão, porem existem ainda necessidade de aumentar as distâncias de interrogação e aperfeiçoamento quer do desenho dos dispositivos quer das unidades de leitura para que seja possível questionar vários dispositivos de forma eficaz.

Este trabalho centrou-se no estudo e aplicação desta tecnologia emergente, com base essencialmente no conhecimento, desenvolvido ao longo dos anos para aplicações dos SAW nas telecomunicações e em artigos científicos que relatam aplicações dos SAW como sensores publicados nos últimos anos.

A aplicação prática dos dispositivos SAW como sensores exige o conhecimento amplo de várias vertentes da ciência e tecnologia, propagação de ondas em meios elásticos, electrónica digital e analógica, instrumentação, materiais, antenas e propagação.

Foi obtida uma configuração final para as estruturas interdigitais de um dispositivo SAW experimental. Desta configuração final foram apresentadas duas variantes, para um dispositivo SAW desenhado a pensar numa série de testes laboratoriais para a medição de várias grandezas físicas e identificação de objectos. O qual ao fim de produzido e testado em campo poderá comprovar os métodos de projecto utilizados neste trabalho, suscitar novas questões ao nível do refinamento do método de projecto e dar origem a aplicações inovadores para estes dispositivos no campo da instrumentação. Entre as quais a obtenção de sensores capazes de medir grandezas físicas e com possibilidade do seu código de identificação ser alterado pelo utilizador, ao contrário das etiquetas actualmente existentes que são fabricadas com um valor fixo.

7.2 Desenvolvimentos futuros

Os desenvolvimentos a efectuar neste trabalho serão a tomada de decisões finais relacionadas com pormenores de construção, encapsulamento dos dispositivos que terão de ser estudados e eventualmente debatidos com especialistas em nano-técnicas com vista à produção de uma pequena série de dispositivos SAW.

Em seguida impõem-se um conjunto de testes em laboratório para a medição e verificação da impedância de entrada do transdutor interdigital de excitação, com base nestes valores, se necessário desenhar um circuito que proporcione adaptação de impedância correcta entre a antena e o dispositivo SAW. Devem ser também verificados os atrasos entre os ecos gerados, se coincidem ou não com o previsto em projecto. Com base nestes resultados desenvolver uma unidade de leitura flexível que permita a leitura dos dispositivos SAW experimentais, num leque variado de configurações e montagens, sendo nesta fase dos trabalhos bastante provável a descoberta de novas aplicações para estes dispositivos.

Uma das aplicações futuras tidas em mente para este trabalho é a sua utilização no desenvolvimento de transdutores de deslocamento para monitorização do comportamento de estruturas em engenharia civil aplicáveis em situações variadas. Actualmente existe a necessidade de monitorizar o comportamento destas estruturas em programas de manutenção e preservação de património histórico, mas também e principalmente para avaliar o envelhecimento necessidade de manutenção ou sobrecarga das estruturas modernas prevenindo eventuais acidentes nos chamados edifícios inteligentes. Assim outro tema de estudo futuro será a obtenção de soluções mecânicas que permitam uma ligação eficaz e fiável do substrato ao meio físico onde serão medidas as grandezas e desenho de um produto final robusto e eventualmente comercializável.

Anexos

Tabela I

VW /lamoda	Cs	cap/franja F	N pares	Lambda m	Esp Cobre m	Fo	Hz	K'2	d	m	Epslon 0	Go (conduct)	Hcm	1/Gc	Hcm
10		7,13E-17	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			1,70E-05		5,88E+04	
20		1,43F-16	250	7,25F-06	1,00F-07	433,9F+6	1,10F-03	1,80F-06	8,85F-12			3,40F-05		2,94F+04	
30		2,14E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			5,10E-05		1,96E+04	
40		2,85E 16	250	7,25E 06	1,00E 07	433,9E+6	1,10E 03	1,80E 06	8,85E 12			6,81E 05		1,47E+04	
50		3,56E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			8,51E-05		1,18E+04	
50		4,20E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			1,02E-04		9,00E+03	
80		5,70E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			1,36E-04		7,35E+03	
100		7,13E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			1,70E-04		5,88E+03	
120		8,56E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			2,04E-04		4,90E+03	
140		9,98E-16	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			2,38E-04		4,20E+03	
150		1,14E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			2,72E-04		3,67E+03	
180		1,28E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			3,06E-04		3,27E+03	
200		1,43F-15	250	7,25F-06	1,00F-07	433,9F+6	1,10F-03	1,80F-06	8,85F-12			3,40F-04		2,94F+03	
220		1,57E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			3,74E-04		2,67E+03	
240		1,71E 15	250	7,25E 06	1,00E 07	433,9E+6	1,10E 03	1,80E 06	8,85E 12			4,08E 04		2,45E+03	
260		1,85E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			4,42E-04		2,26E+03	
280		2,00E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			4,76E-04		2,10E+03	
300		2,14E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			5,10E-04		1,96E+03	
320		2,28E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			5,44E-04		1,84E+03	
340		2,42E-15	250	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12			5,78E-04		1,73E+03	

Tabela II

W /lambca	Cs	cao/franja F	N pares	Lambda m	Esp Cobre m	Fc	Hz	K^2	d	m	Epslon 0	Go (condut)	Hom	1/Go	Hom
200		1,35E-14	20	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	2,07E-05	4,83E+04		
200		1,35E-14	40	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	8,28E-05	1,21E+04		
200		1,35E-14	60	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	1,86E-04	5,37E+03		
200		1,35E-14	80	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	3,31E-04	3,02E+03		
200		1,35E-14	100	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	5,17E-04	1,93E+03		
200		1,35E-14	120	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	7,45E-04	1,34E+03		
200		1,35E-14	140	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	1,01E-03	9,86E+02		
200		1,35E-14	170	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	1,49E-03	6,69E+02		
200		1,35E-14	190	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	1,87E-03	5,36E+02		
200		1,35E-14	210	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	2,28E-03	4,38E+02		
200		1,35E-14	230	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	2,74E-03	3,65E+02		
200		1,35E-14	250	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,00E-06	1,00E-06	0,05E-12	3,23E-03	3,09E+02		
200		1,35E-14	270	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,00E-06	1,00E-06	0,05E-12	3,77E-03	2,65E+02		
200		1,35E-14	290	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	4,35E-03	2,30E+02		
200		1,35E-14	310	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	4,97E-03	2,01E+02		
200		1,35E-14	330	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	5,63E-03	1,78E+02		
200		1,35E-14	350	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	6,34E-03	1,58E+02		
200		1,35E-14	370	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	7,08E-03	1,41E+02		
200		1,35E-14	390	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	7,87E-03	1,27E+02		
200		1,35E-14	400	7,25E-06		9,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	1,80E-06	8,85E-12	8,28E-03	1,21E+02		

Tabela III

W /lambda	Cs	cap/franja F	N pares	Lambda m	Esp metal m	Fo	Hz	K ^{o2}	d	m	Epslon 0	Go (condut)	Hom	1/Go	Hom	h/lambda	%
200	3,56E-16		300	7,25E-06	2,50E-08	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,23E-04	8,16E+03		0,34			
200	7,13E-16		300	7,25E-06	5,00E-08	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		2,45E-04	4,08E+03		0,69			
200	1,07E-15		300	7,25E-06	7,50E-08	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		3,68E-04	2,72E+03		1,03			
200	1,43E-15		300	7,25E-06	1,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		4,90E-04	2,04E+03		1,38			
200	1,78E-15		300	7,25E-06	1,25E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		6,13E-04	1,63E+03		1,72			
200	2,14E-15		300	7,25E-06	1,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		7,35E-04	1,36E+03		2,07			
200	2,50E-15		300	7,25E-06	1,75E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		8,58E-04	1,17E+03		2,41			
200	2,85E-15		300	7,25E-06	2,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		9,80E-04	1,02E+03		2,76			
200	3,21E-15		300	7,25E-06	2,25E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,10E-03	9,07E+02		3,10			
200	3,56E-15		300	7,25E-06	2,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,23E-03	8,16E+02		3,45			
200	3,92E-15		300	7,25E-06	2,75E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,35E-03	7,42E+02		3,79			
200	4,28E-15		300	7,25E-06	3,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,47E-03	6,80E+02		4,14			
200	4,63E-15		300	7,25E-06	3,25E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,59E-03	6,28E+02		4,48			
200	4,99E-15		300	7,25E-06	3,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,72E-03	5,83E+02		4,83			
200	5,35E-15		300	7,25E-06	3,75E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,84E-03	5,44E+02		5,17			
200	5,70E-15		300	7,25E-06	4,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		1,96E-03	5,10E+02		5,52			
200	6,06E-15		300	7,25E-06	4,25E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		2,08E-03	4,80E+02		5,86			
200	6,42E-15		300	7,25E-06	4,50E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		2,21E-03	4,54E+02		6,21			
200	6,77E-15		300	7,25E-06	4,75E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		2,33E-03	4,30E+02		6,55			
200	7,13E-15		300	7,25E-06	5,00E-07	433,9E+6	1,10E-03	1,80E-06	8,85E-12		2,45E-03	4,08E+02		6,90			

Referencias e bibliografia

- [1] Alfred Pohl, *"A Review of Wireless SAW Sensors"*, IEEE Transactions on Ultrasonic's, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 47, Nº2, March 2000.
- [2] Colin K. Campbell, *"Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications"*, Academic Press, 1st edition (June 15, 1998), ISBN-10: 0121573400.
- [3] W.Wilson, G. M. Atkinson, *"Mixed Modeling of a SAW Delay Line Using VHDL"*, NASA Langley Research Center.
- [4] Mousa Hoummady, Andrew Campitelli, *"Acoustic Wave Sensors: design sensing mechanisms and applications"*, Smart Materials Structures, vol6, 1997.
- [5] Clinton S. Hartman *"A Global SAW ID Tag With Large Data Capacity"*, Proceedings of 2002 IEEE Ultrasonic's Symposium.
- [6] F. Schmit, O. Sczesny, *"Remote Sensing of Physical Parameters by Means of Passive Surface Acoustic Wave Devices"*, IEEE, Ultrasonic's Symposium, 1994.
- [7] Richard M. White, *"Surface Elastic Waves"*, Proceedings of the IEEE, vol.58, Nº8, August 1970.
- [8] Richard Feinman, *"The Feinman Lectures on Physics"*, Vol.1, caps. 47, 48, 49, 51.
- [9] Marcelo Alonso, Eduard Finn, *"Física um Curso Universitário"*, vol.2, campos e ondas, Addison-Wesley, 1967.
- [10] John G. Webster, *"Measurement Instrumentation and Sensors Handbook"*, cap.6, CRC Press, 1999.
- [11] A. J. Moulson, J. M. Herbert, *"Electroceramics 2nd Edition"*, Wiley 2003.
- [12] Sergey Yurish, Maria Teresa Gomes, *"Smart Sensors and MEMS"*, Nato Science Series, II Mathematics, Physics and Chemistry, vol.181, Kluwer Academic Publishers, 2004.

- [13] Richar White, F. Voltmer, *“Direct Piezoelectric Coupling to Surface Elastic Waves”*, Applied Physics Letters, vol.7, Nº12, 1965
- [14] Donald Malocha, *“Evolution of the SAW Transducer for Communication Systems”*
- [15] Alexander Manishev, Kishore Sundara, *“Interdigital Sensors and Transducers”*, Proceedings of the IEEE, vol.92, Nº5, May 1994.
- [16] C. Hartman, P. Brown, *“Design of Global SAW RFID Tag Devices”*, Second International Symposium on Acoustic Wave Devices For Future Mobile Communication Systems, March 2004.
- [17] Khushid Alam, *“SAW devices for Integrated Applications”*, Microelectronic Engineering Research Conference, 2001.
- [18] Jason Sternhagen, Kraig Mitzner, *“A Direct Digital Synthesis System for Acoustic Wave Sensors”*, IEEE, Sensors Journal, vol2, Nº4, August 2002.
- [19] *“Surface Acoustic Wave Filter for TV, Application Manual”*, Murata Manufacturing CO., Ltd.
- [20] L. Reindl, G. Scholl, *“Wireless Remote Identification and Sensing With SAW Devices”*, Proceedings Sensors, vol.1, 1997.
- [21] Josep Gierut, Ray Lohr, *“Automotive Power Train & Chassis Torque Sensor Technology”*, Honeywell, 2005.
- [22] *“European Telecommunication Standard”*, ETS300384 January 1995.
- [23] *“Quadro Nacional de Atribuição de Frequências”*, ANACOM, 2005.
- [24] *“R900 Datasheet”*, Epcos, 2004.
- [25] *“SOFIS – Siemens Surface Acoustic Wave Identification System”*, Siemens AG transportation Systems.

- [26] James Smith, Vicki Hinson, *"The new era of SAW devices"*, American Chemical Society, 2006.
- [27] Alfred Pohl, Gerald Ostermayer, *"Wireless Measurement of Tire Pressure Using Passive SAW Sensors"*, Proceedings Sensor, 1997.
- [28] Alfred Pohl, Reinhard Steindl, *"Measurements of Vibration and Acceleration Utilizing SAW Sensors"*.
- [29] Ching Chen, Mingfu Cao, *"A study of an electronic nose for detection of lung cancer based on a virtual SAW gas sensors array and image recognition"*, IOP Publishing Ltd, 2005.
- [30] *"Surface Acoustic Wave (SAW) Sensing Technology for the Detection of Nerve and Blister Agents"*, MSA.
- [31] Chew Sim, Mohd Ahamad, *"Chemometric Classification of Herb-Orthosifon stamineus, According to Its Geographical Origin Using a Virtual Chemical Sensor Based Upon Fast GC"*, Sensors 2003, vol. 3, pag. 458-471.
- [32] Edward Staples, Shecar Visswanathan, *"Odour Detection and Analysis using GC/SAW zNose"*, Air & Waste Management Association, 98th annual Conference & Exhibition.
- [33] Leonard Reindl, Alfred Pohl, *"SAW-Based Radio Sensor Systems"*, IEEE sensors journal, vol1, nº1, June 2001
- [34] Kent Smith, *"Antennas for Low Power Applications"*, RFM, application note.
- [35] Matthew Loy, *"Understanding and Enhancing Sensitivity in Receivers for Wireless Applications"*, technical brief, Texas Instruments, SWRA030.
- [36] Martin Sadd, *"Elasticity, Theory, Applications and Numerics"*, Elsevier Academic Press, 2005, ISBN --12-605811-3.
- [37] António Fernandes, *"Antenas de Onda estacionária"*, Fundação Calouste Gulbenkian
- [38] Wolf Bulst, Evelyn Riha, *"Reproducible Fabrication of Surface Acoustic Wave Filters"*, Telecom Report, pag. 247-252, 1987.
- [39] Matew loy, Ilboun Sylla, *"ISM Band and Short Range Device Antennas"*, application report SWRA0461, March 2005.

- [40] J. Oliveira, M Fontes, “Matemática Para o estudo da Física”, Fundação Calouste Gulbenkian.

- [41] Leland Jackson, “*Signals, Systems and transforms*”, Addison Wesley, 1991, ISBN 0-201-09589-0.

- [42] W. Davis, Krisna Agarwal, “*Radio Frequency Circuit Design*”, John Wiley & Sons, 2001, ISBN 0-471-35052-4

- [43] A. Carlson, “*Communication Systems*”, McGraw-Hill, 3 ed., 1986, ISBN 0-07-100560-9

- [44] Rainer Waser, “*Nanoelectronics and Information Technology*”, Wiley-VCH, 2003, ISBN 3-527-40363-9

- [45] Kai Chang, “*RF and Microwave Wireless Systems*”, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0-471-35199-7

